

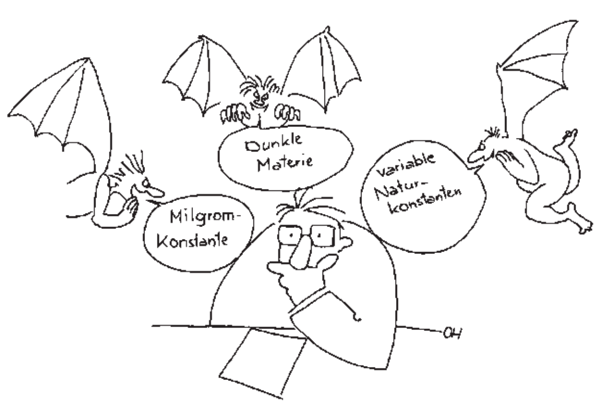
Reinhard Breuer
Chefredakteur

Konstantes Ärgernis oder die Suche nach dem Fundamentalen

Was könnte mehr einschläfern als eine Debatte über etwas, das sich gar nicht ändert? Doch Kosmologen und Physiker geraten regelmäßig aus dem Häuschen, spricht man die „Konstanz der Naturkonstanten“ an. Sieht man jedoch, wie dieses Thema das Selbstverständnis von Astronomen und Teilchenphysikern gleichermaßen berührt, wird die Aufregung klar.

Es geht darum, was dem Weltbild der Naturwissenschaft als Fundament dienen kann. Offenbar sind dabei einige Konstanten fundamentaler als andere. Zusammengenommen aber bilden sie einen Fundus ominöser Zahlen, der alle Naturgesetze durchzieht und Forscher rätseln lässt, was dahinter steckt.

In jeder Konstanten verbirgt sich, wie manche Theoretiker behaupten, ein Geheimnis, das sich erst durch Herleitung aus einer fundamentaleren Theorie erklärt. So entsteht der Wunsch, dass sich eines fernen Tages alle Konstanten (vielleicht bis auf eine) aus dem alles vereinigenden Grundgesetz der Natur herleiten lassen. Dass dies bisher nicht gelang, ist ein konstantes Ärgernis für alle, die sich auf die schwierige Suche nach der ultimativen Theorie der Natur – früher „Weltformel“ genannt – begeben. Ohne diese allumfassende Erklärung bleibt die Frage offen, warum Naturkonstanten ausgerechnet die Werte annehmen, die sie nun einmal haben.



Von anderer Qualität ist es, wenn Fundamentalkonstanten als variabel postuliert werden. Im Standardmodell der Teilchenphysik wird dies teilweise schon akzeptiert: Ihre Kopplungskonstanten sind von der Energie abhängig. Viel gewagter erscheint es aber, wenn der Astrophysiker Mordehai Milgrom hartnäckig die These vertritt, die Hypothese der Dunklen Materie sei überflüssig, wenn man seinem Rat folge und eine kleine Korrektur an Newtons Kraftgesetz – Kraft gleich Masse mal Beschleunigung – akzeptiere. Dass diese Idee auch nach fast zwanzig Jahren noch nicht „tot“ ist, hat zwei Gründe: Einerseits konnten Astronomen in dieser Zeit die Dunkle Materie einfach nicht finden; andererseits passt Milgroms Ad-hoc-Ansatz erstaunlich gut zu einigen neueren Galaxienbeobachtungen (siehe Seite 34).

Der *Advocatus diaboli* vom Weizmann-Institut in Israel bringt damit zwar einige Astronomen auf seine Seite, aber nicht wenige Theoretiker gegen sich auf. Denn Milgrom führt für seinen Zweck eine neue Naturkonstante ein, welche Newtons Kraftgesetz für sehr kleine Werte der Beschleunigung abändert. Das hat zwar den Charme, dass damit die Dunkle Materie so überflüssig wird wie einst der Äther durch Einsteins Spezielle Relativitätstheorie. Aber es vergrößert den Fundus der Naturkonstanten, was Physiker etwa so lieben wie die Krätze. Darum wäre zu wünschen, dass die Kosmologen den Fall Milgrom möglichst bald aufklären – so oder so.

FORSCHUNG AKTUELL

12 **Vom Asteroidengürtel nach Neuschwanstein**
Ein spektakulärer Meteor gibt seine ungewöhnliche Herkunft preis

14 **Ein lichtgetriebener Molekülmotor**
Die kleinste Maschine der Welt setzt Strahlung in Bewegung um

17 **Nachgehakt**
Muss Musil modern?

21 **Ende einer unendlichen Geschichte**
Beweis erbracht: Defizit an Solarneutrinos beruht auf Oszillationen

23 **Bild des Monats**
Maus mit Menschenhirn

SPEKTROGRAMM

42 **Heilsamer Selbstmord**
Wankendes Weltbild
Riffe aus Bakterien
Älteste Dame Europas?
Schwarze Löcher verschmelzen
Sammeltaxi für Frösche

THEMEN

24 **Die neue Sklaverei**
Trotz internationaler Ächtung werden Menschen auch heute noch zum Besitz

34 **TITELTHEMA**
Dunkle Materie – überflüssig
Die Alternative heißt „Mond“

44 **Kunstherz**
Neuentwicklung gibt totgesagter Mechanikpumpe nach Jahren der Stagnation wieder Auftrieb

56 **Saboteure in Samenzellen**
Bakterien manipulieren die Fortpflanzung bei Insekten

62 **Feldzug gegen Viren**
Genomforschung deckt Achillesfersen von Viren auf

72 **Ungerechte Wahlverfahren (Teil IV)**
Beispiele aus der Realität

80 **Technoskop-SPEZIAL:**
Fabrik auf dem Chip
Reifeprüfung für Mikrosysteme

TITELBILD:

Sternsysteme wie diese Galaxie werden nach gängiger Theorie von unsichtbarer Materie zusammengehalten. Ein nur geringfügig verändertes Kraftgesetz könnte die Suche nach dieser Substanz überflüssig machen.

Grafik: Cleo Vilett und Rob Miller



TITELTHEMA: KOSMOLOGIE

Seite 34

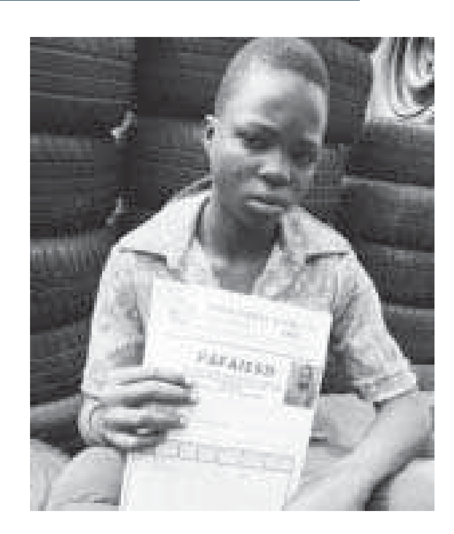
Gibt es Dunkle Materie?

Eine unsichtbare, unbekannte Substanz annehmen, die 95 Prozent des Universums ausmacht – oder lieber die Newton'sche Dynamik ein wenig ändern

SOZIALPSYCHOLOGIE Seite 24

Ware Mensch – die neue Sklaverei

Die Rechtslage ist eindeutig: Weltweit gilt die Slaverei als illegal. Dennoch blüht der Handel mit der Ware Mensch – und das nicht nur in der Dritten Welt.



MEDIZINTECHNIK Seite 44

Technik, die das Herz ersetzt

Ein neues Herz ist schwer zu haben. Wie weit kann raffinierte Technik ein lahmendes Organ unterstützen oder sogar ganz ersetzen?



SOZIOBIOLOGIE Seite 56

Bakterientricks und Insektensex

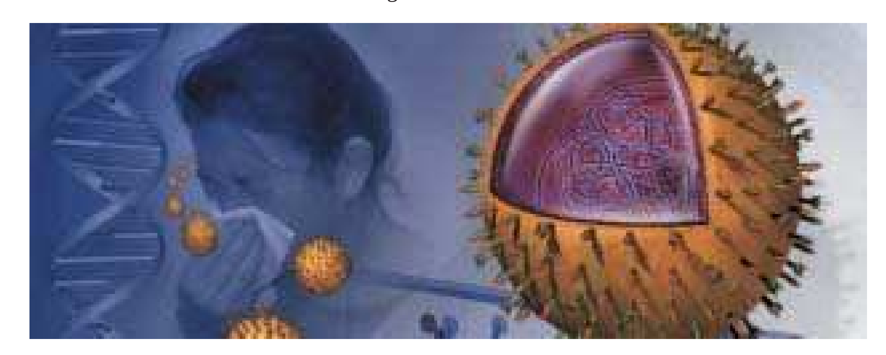
Ein winziges Bakterium wandelt männliche Embryonen in weibliche um, macht Spermien zu Giftspritzen und Weibchen weniger wählerisch gegenüber Männchen. Wie weit geht die Macht dieser Mikrobe?

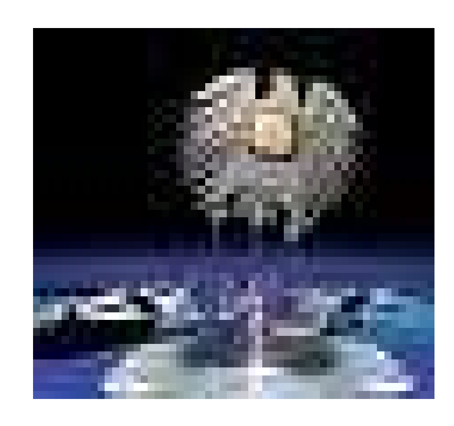


PHARMAFORSCHUNG Seite 62

Aufbruch in die Ära der Virenbekämpfung

Gegen Bakterien gibt es Antibiotika, aber gegen Viren war die Medizin lange machtlos. Vor allem dank der Gentechnik hat sich dies nun geändert. Die Entzifferung des Erbguts von immer mehr Viren deckte Achillesfersen dieser tückischen Erreger auf, an denen inzwischen etliche Medikamente erfolgreich ansetzen.





WAHLEN (TEIL IV) Seite 72

Die Ungerechtigkeit der Wahlverfahren

Wahlgesetze von zweifelsfrei demokratischem Charakter produzieren die sonderbarsten Widersprüche – im Parlament von Mexiko ebenso wie in den Stadträten und Kreistagen Bayerns.

TECHNOSKOP-SPEZIAL Seite 80

Fabrik auf dem Chip

Sie galten als Hoffnungsträger, sie galten als Enttäuschung: Jetzt sind Mikrosysteme auf dem Weg zum Markt.



FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

94 **Zeitenwende** Die Kluft zwischen den Generationen schließt sich

98 **Großer Brückenschlag in der Algebra** Fields-Medaille 2002

102 **Ausgezeichnet** Georg Heberer Award und Adolf-Messer-Preis 2002

REZENSIONEN

104 **Living Jewels** von Poul Beckmann
It Must be Beautiful von Graham Farmelo (Hg.)
Unsere einsame Erde von Peter D. Ward und Donald Brownlee
Die Welt der lebenden Fossilien von Walter Kleesattel
Mit dem Luftschiff über den Wipfeln des Regenwaldes von Francis Hallé, Dany Cleyet-Marrel und Gilles Ebersolt

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

116 **Wasserschwall und Überschall**

WEITERE RUBRIKEN

5 **Editorial**

8 **Leserbriefe**

9 **Impressum**

61 **Im Rückblick**

78 **Wissenschaft im Alltag** Windkraftwerke

92 **Wissenschaft in Unternehmen**

107 **Preisrätsel**

114 **Wissenschaft im Internet**

121 **Stellenmarkt** Lehre und Forschung

126 **Vorschau**



Nach neuer Erkenntnis stecken Entzündungsprozesse als treibende Kraft hinter einer Arteriosklerose.

Arteriosklerose als Entzündung – Juli 2002

Erstaunt war ich, dass in dem Interview innerhalb dieses Artikels zwar acht Risikofaktoren präzise aufgeführt werden, jedoch Bewegungsmangel als Risikofaktor und körperliche Aktivität als ein relativer Schutzfaktor fehlen. Wenn dort – richtigerweise – von Übergewicht, Insulinresistenz, Zigarettenrauchen, Bluthochdruck, Fettstoffwechselstörungen und Diabetes die Rede ist, so lassen sich alle genannten Faktoren – Zigarettenrauchen ausgenommen – durch erhöhte körperliche Aktivität erfolgreich bekämpfen. Auf internationalen präventivmedizinischen Veranstaltungen besteht darüber kein Zweifel mehr.

Prof. Wildor Hollmann, Köln

Das kleinste Großlabor der Welt – Juni 2002

Bei der Lektüre des (übrigens fachlich sehr lehrreichen) Artikels könnte man den Eindruck gewinnen, dass die Forschung zu DNA-Chips im deutschsprachigen Raum eine eher singuläre Angelegenheit ist. Eine gute Übersicht bietet seit einigen Jahren die immer sehr früh ausgebuchte öffentliche Veranstaltung „Statusseminar DNA-Chiptechnologie“, die jeweils im Januar in Frankfurt am Main stattfindet und zu der auch ein Internetverzeichnis von Forschungsgruppen vorhanden ist (*http://dechema.de/chips*).

Dr. Leo Nick, Bad Dürkheim

Keine Frage der Hautfarbe
Forschung aktuell, Juni 2002

In diesem Beitrag ist ein Aspekt untergegangen: Es ist richtig, dass die bloße Hautfarbe nicht ausreicht, um eine wissenschaftlich fundierte Aussage zu erwünschten und unerwünschten Nebenwirkungen bei Medikamenten zu dokumentieren.

Das bedeutet aber für die Umsetzung, dass bei allen Studien zur Untersuchung neuer Medikamente an Probanden und Patienten DNA-Merkmale erfasst werden. Es ist bereits heute in den industrialisierten Staaten teilweise problematisch, kooperative Patienten für Studien zu gewinnen. Hinzu käme, dass die Patienten auf eine solche DNA-Untersuchung hingewiesen werden müssten. Möglicherweise sind auch noch modifizierte Wünsche der jeweiligen Ethikkommission zu berücksichtigen. Den Kostenfaktor für die DNA-Untersuchung sehe ich dabei eher als relativ an.

Ein interessanter Nebeneffekt am Rande: Eine solche Untersuchung würde wohl auch „schwarze Schafe“ bei den Investigatoren zu Tage fördern. Nämlich, wenn diese mit Patienten arbeiten, die nur auf dem Papier stehen.

Lothar L. Hornung, Berlin

Die Ursprache der Alteuropäer – Mai 2002

Zweifelhafte Annahme

Diese Beiträge erfordern Widerspruch. Sicher ist ständige Revision Pflicht jedes Wissenschaftlers. Für das Gebiet der Etymologie, wo manches Vermutung bleibt, trifft dies besonders zu. Wenn man jedoch gut gesicherte Ergebnisse preisgeben will (Garbe, München), so wären deren Herleitung zu widerlegen und neue Hypothesen vorsichtiger zu bilden.

Dass in Europa besonders in Gewässer- und Ortsnamen unterschiedliches vorindogermanisches Substrat weiterlebt, ist unbestritten, berechtigt aber nicht zur Annahme einer baskischen Ursprache, wo doch das Baskische durch zahllose Entlehnungen aus anderen Sprachen geprägt ist und die Vaskonen erst sehr spät in der Geschichte aufgetreten sind. Paläanthropologische Befunde und die Vielzahl der Kulturen in der Jungsteinzeit sprechen ebenso dagegen. Auch wäre zu diskutieren, ob die genetischen Besonderheiten nicht durch die Isolation und lange Unabhängigkeit der Basken zu erklären sind.

Prof. Hellmut Thomke, Allmendingen, Schweiz

Urform nicht rekonstruierbar

Die Annahme, das Baskische sei der letzte Rest einer vor der Indogermanisierung Europas weit verbreiteten Sprache oder Sprachgruppe, ist nicht neu, und es wird beispielsweise seit langem eine hispano-kaukasische Substratsprache im mediterranen Bereich angenommen. Theo Vennemann geht nun wesentlich weiter und sieht im Vaskonischen „die Ursprache des Kontinents“.

Es ist mangels verwandter Sprachen gar nicht rekonstruierbar, auf welche endeiszeitliche Urform beispielsweise baskisch „ibara“ (Tal) zurückgehen sollte; aus irgendwelchen anklingenden Fluss- und Ortsnamen bis ins Baltikum lässt sich das gewiss nicht erschließen.

Wenn auch wahrscheinlich ist, dass mehr oder weniger große Gebiete Europas ursprünglich nicht von indogermanischen Sprachen eingenommen waren, so folgt daraus keineswegs, dass in ihnen nur eine einzige Sprache verbreitet war.

Ich finde es schon bedauerlich, dass eine so wilde Theorie einem größeren Publikum als Tatsache vorgeführt wird.

Diether Schürr, Gründau

Frag mal einen Jäger!

Der Beitrag über die Ursprache der Europäer hat mir sehr gefallen, und ich fand ihn sehr überzeugend. Nur dass der falsche Bezug der Sprachwurzel von Eber auf das männliche Wildschwein bezogen wird, ist nicht in Ordnung, auch wenn das im Ortswappen von Ebrach so dargestellt ist, das ist nämlich der Keiler (man frage mal einen Jäger!). Der Eber ist das männliche Hausschwein.

Prof. Heiner Flick, Marktoberdorf

Erratum

Golfbälle – Wissenschaft im Alltag, August 2002

In der Bildlegende auf Seite 73, rechts unten, hätte stehen müssen: Der Schlägerkopf überträgt einen Drehimpuls senkrecht zur Flugrichtung, dadurch rotiert der Ball wie dargestellt gegen die Flugrichtung.

Die Redaktion

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 91 26-729

Was uns wirklich vom Affen unterscheidet
Spektrogramm, Juni 2002

Genforschung – sehen wir schon das Ende der Sackgasse? Oder öffnet sich das Tor zu einer Genforschung höherer Ordnung – nämlich über die Gene, die die Nutzung der Gene steuern?

Dr. Hanns Kramberg, Wien


MPI FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

Unser Genom ist zu 99 Prozent identisch mit dem von Schimpansen.

Das Erbgut eines Lebewesens ist die Grundlage seines Aufbaus und seiner biochemischen Prozesse. Die Art, wie die Gene dann abgelesen und ausgewertet werden, hängt somit ebenfalls nur von ihnen selbst ab. Also ist letztlich doch allein die DNA für den Unterschied zwischen Affen und Menschen verantwortlich. 1 Prozent reicht eben aus!

Johannes Merkle, Hofheim

Kinder, Kinder – Nachgehakt, Mai 2002

Die Beiträge von Michael Groß habe ich öfter mit Spaß und Gewinn gelesen. Aber wie der Autor sich hier der ethischen Fragestellung nähert, ob Eltern mittels PID einen Embryo produzieren dürfen mit dem Ziel der Verbesserung von Heilungschancen für ein Geschwisterkind, finde ich allerdings wenig amüsant. Seine verwunderte Verständnislosigkeit gegenüber der ablehnenden Haltung „so genannter Lebensschützer" wirkt kaum überzeugend. Denn zumindest die theoretische Grundlage einer solchen Position ist leicht dingfest zu machen und allgemein bekannt, nämlich die kantische Maxime, nach der ein Mensch für einen anderen niemals bloßes Mittel sein darf.

Sicherlich muss man eine solche Grundauffassung nicht unbedingt teilen. Richtig ist, dass die Frage, welche konkreten Handlungen und Umstände jeweils unter das Verdikt fallen, sich keineswegs immer so eindeutig beantworten lässt, wie Fundamentalisten das mitunter glauben machen wollen. Der klügere Wertkonservatismus ist allerdings zur Reflexion dieses Umstands durchaus in der Lage.

Dr. Michael Körner, Dülmen

Die Mär vom Jungbrunnen
Essay, August 2002

Wahr ist, dass unglaublich viel Scharlatanerie mit so genannten Anti-aging-Produkten betrieben wird. Sie werden auch gekauft, denn unsere Gesellschaft macht es uns durch die Medien immer wieder vor – gesund, glücklich und beliebt ist nur, wer jung ist. In dem Essay wird behauptet, dass der Alterungsprozess nicht messbar ist, deshalb kann man keine Aussage darüber treffen, ob eine Anti-Alterungs-Therapie Erfolg hat. Das ist nicht ganz richtig. Als Indikator für den Alterungsprozess und die Auswirkungen von Therapieansätzen dienen z. B. so genannte Genexpressionsprofile. Hiermit kann eindeutig festgestellt werden, welche Gene durch das Altern beeinflusst werden. Die Expression bestimmter Gene wird z. B. durch eine Diät positiv beeinflusst und mimt einen jugendlichen Charakter.

Die Aussage, dass Melatonin das Krebsrisiko bei Mäusen steigert, ist pauschal gesehen falsch. Es gibt ziemlich widersprüchliche Ergebnisse bei der Untersuchung der Rolle von Melatonin in der Onkogenese. Es wurde festgestellt, dass es onkogene Zellproliferation (in humanen Zelllinien) mindert. Ferner zeigt es einen antimutagenetischen Effekt bei Mäusen mit induziertem Cervix- und Vagina-Karzinom. Andererseits fördert Melatonin die Karzinogenese in Mäusen mit angeborener Neigung, Krebs zu entwickeln.

Selbst wenn der Alterungsprozess eines Tages enträtselt wird und wir 125 Jahre alt werden können – wollen wir das? Ist es nicht wichtiger, „gesund" zu altern und zu akzeptieren, dass das Leben mit dem Tod endet?

David Resühr, Hamburg

Einstein auf dem Prüfstand
Forschung aktuell, Juli 2002

In dem Artikel wird bei der Beschreibung der Messapparatur davon ausgegangen, dass die Länge der Vorrichtung bezüglich relativistischer Einflüsse konstant ist. Das ist jedoch nicht der Fall, wie sich leicht zeigen lässt (leider ist hier kein Platz dafür). Es wäre also zu überlegen, wie die relativen Längenunterschiede der Messapparatur, die auch noch zur Änderung der Wellenlänge des Lichtstrahls proportional sein sollten, kompensiert werden können.

Waldemar Sabais, Gröbenzell

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle, Christina Peiberg
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer, Andreas Merkert (stv. Hersteller)
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-729
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (0 62 21) 91 26-770
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. (0 62 21) 91 26-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Bernhard Epping, Dr. Werner Gans, Andrea Jungbauer, Stephen Koszudowski, Dr. Sebastian Vogel, Maria Yiallouros.

Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-600, Fax (0 62 21) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Marianne Blume, Tel. (0 62 21) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (02 11) 887-23 79, Fax (02 11) 887-23 99 verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-23 86, Fax (02 11) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 94, Fax (0 40) 33 90 90; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16–18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 88; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16

ivw

Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 87, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 23 ab 01.01.2002.
Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971

Ein Teil unserer Auflage enthält eine Beilage von Meister Verlag, München; VNR Verlag, Bonn; Rothacker, Martinsried; Heinz Heise Verlag, Hannover und Wissenschaft Online, Heidelberg. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

METEORITEN

Vom Asteroidengürtel nach Neuschwanstein

Eine spektakuläre Feuerkugel über Südbayern in diesem Frühjahr erwies sich als Glücksfall für die Planetenforscher. Der zugehörige Meteorit konnte in den Alpen geborgen und als Bote vom Asteroidengürtel ausgemacht werden.

Von Thorsten Dambeck

Es war am 6. April kurz nach 22 Uhr, als Nachtschwärmer in Südbayern und Tirol ein ungewöhnliches Schauspiel erlebten: Binnen weniger Sekunden zog ein greller Feuerball über den nächtlichen Himmel. Hunderte sahen die eindrucksvolle Erscheinung; besorgte Anrufer hielten Polizei und Medien in Atem. Aber auch zahlreiche Amateurastronomen, wegen des günstigen Wetters auf der Suche nach dem Kometen Ikeya-Zhang, wurden Zeugen des Ereignisses. Die stationäre Videokamera eines Tierbeobachters im bayrischen Murnau zeichnete sowohl die vom Meteor hell erleuchtete Landschaft als auch das 25 Sekunden dauernde Donnergrollen auf.

Aber nicht nur für die zufälligen Beobachter des Spektakels war dies ein denkwürdiger Abend, er sollte auch ein Highlight für die Meteoritenforschung werden: „Auf diesen Moment haben wir Jahrzehnte gewartet“, sagte Dieter Heinlein auf der internationalen Konferenz „Asteroiden, Kometen, Meteore ACM-2002“ in Berlin Anfang August. Pünktlich zur Tagungseröffnung konnte der Koordinator des Europäischen Feuerkugelnetzes den 450 Teilnehmern den Verursacher des bayrischen Frühlingsfeuerwerks präsentieren: einen faustgroßen schwarzen Steinmeteoriten mit einer Masse von 1750 Gramm. Berliner Amateurastronomen hatten das Fragment nur wenige Tage zuvor bei einer gezielten Suchaktion entdeckt. Es lag an prominenter Stelle: nur sechs Kilometer entfernt von Neuschwanstein, dem berühmten Schloss König Ludwigs II.

Mit automatischen Kameras auf Meteorjagd

Der Fund krönt die langjährige Arbeit des Feuerkugelnetzes, das in der Bundesrepublik vom Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) betreut wird. Zuletzt war es in Europa 1959 gelungen, einen Meteoriten auf Grund fotografischer Beobachtungen zu bergen. Auch in den USA und in Kanada ist bisher nur je ein solcher Fund bekannt. Trotz ihrer geringen Zahl sind diese Meteoriten aber von enormem wissenschaftlichem Wert: Aus ihrer Leuchtspur am Himmel lässt sich ihre Umlaufbahn um die Sonne errechnen und damit ihre Herkunft ableiten – eine äußerst wichtige Information.

Mit dem Aufbau des europäischen Netzes war in den 1950er Jahren in der damaligen Tschechoslowakei begonnen worden. Zehn Jahre später schloss sich Deutschland an. Mittlerweile sind Stationen in Österreich, Belgien und Luxemburg hinzugekommen; insgesamt ist so das weltweit einzige großflächige Meteor-Beobachtungsnetz entstanden.

Jede Nacht sind 25 automatische Kameras im Einsatz. Überwiegend handelt es sich um schlichte Kleinbildkameras, die mit dauerhaft geöffnetem Verschluss einen Parabolspiegel ablichten, der den gesamten Himmel erfasst. In der Tschechischen Republik bannen dagegen hochauflösende Fisheye-Objektive den Nachthimmel auf großformatigen Planfilm. Auf den Langzeitbelichtungen sind die Spuren der Sternschnuppen deutlich von denen der Sterne unterscheidbar – als kurzzeitige Erscheinungen nehmen sie nicht sichtbar an der Himmelsrotation teil, erzeugen also weitgehend geradlinige statt kreisförmiger Spuren. „Zwölfmal pro Sekunde unterbricht eine Sektorblende die Aufnahme, so können wir später die Geschwindigkeit des Meteors im leuchtenden Teil seiner Bahn bestimmen“, erklärt Heinlein.

Auch am 6. April verrichteten die Stationen ihren Dienst. „Eine sofortige Entwicklung der Filme zeigte, dass acht deutsche Kameras und je eine in Öster-



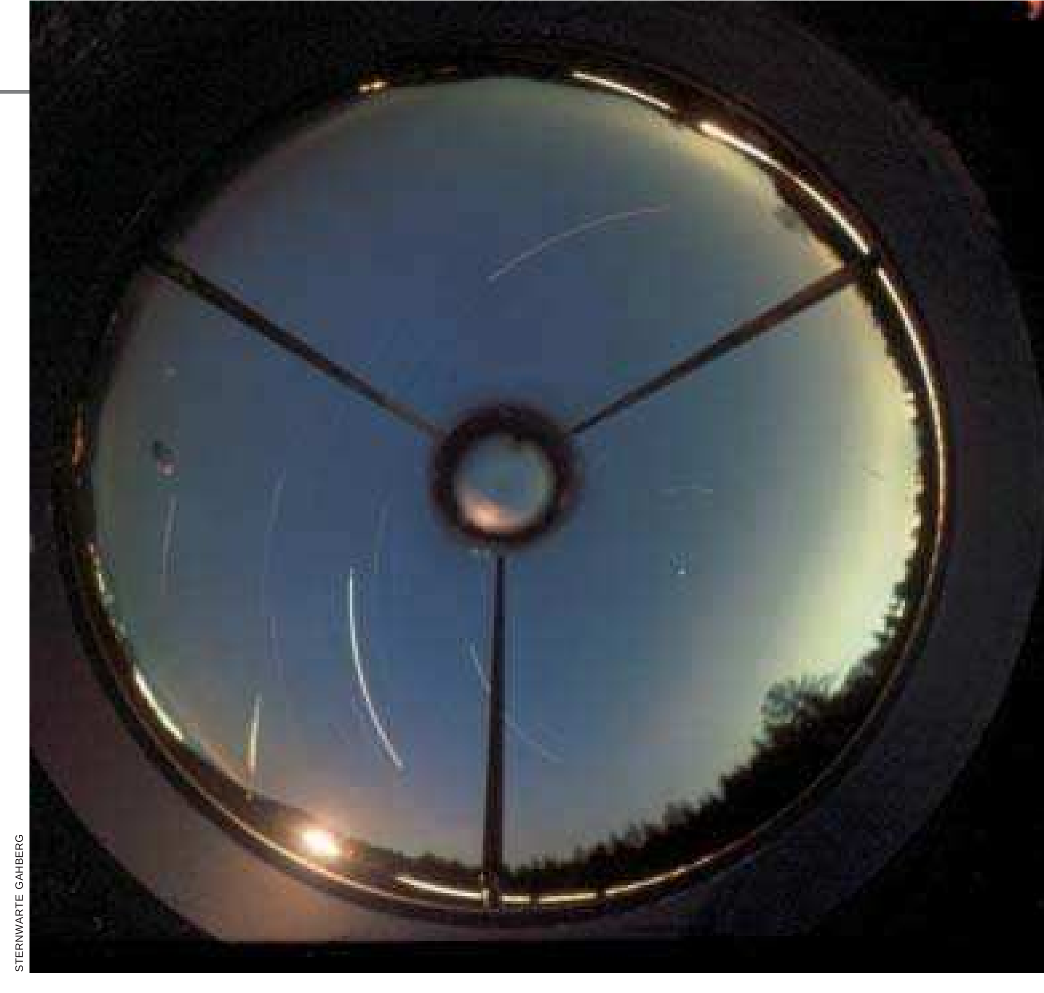
DIETER HEINLEIN



DIETER HEINLEIN

Um die genaue Bahn der Neuschwanstein-Feuerkugel zwischen Innsbruck und Ammerwaldsattel (links, violetter Pfeil) zu ermitteln, wurden die Aufnahmen von sieben Ortungskameras (violette Kreise) ausgewertet. Ein erstes, 1750 Gramm schweres Fragment des Meteoriten (oben) fand sich im vorausberechneten Fallgebiet unweit von Neuschwanstein. Der Magnet ist 30 Millimeter lang.

Die Meteorspur auf der Farbaufnahme der Meteorkamera in Gahberg (Österreich) wechselt von Grün über Gelb nach Rot.


STERNWARTE GAHBERG

reich und Tschechien die Feuerkugel fotografiert hatten", erinnert sich Heinlein. Die Auswertung der Fotos und weiterer Aufzeichnungen ergab, dass der Stein etwa 600 Kilopond gewogen und knapp einen Meter gemessen hatte, als er in die Erdatmosphäre eintauchte. Heinlein: „Wie mit einem Sandstrahlgebläse ist das äußere Material beim Flug durch die Lufthülle weggerissen worden. Erst in der letzten Flugphase, als der Körper bereits stark abgebremst war, entstand die schwarze Schmelzkruste"; sie ist erfahrungsgemäß nur etwa einen Millimeter dick.

Ein tschechisches Fotometer registrierte auch Änderungen in der Helligkeit der Sternschnuppe. Zu Leuchtausbrüchen kommt es, wenn der Stein im Flug auseinander bricht. Während der Hauptfragmentierung strahlte die Feuerkugel kurzzeitig heller als der Vollmond. Mit den in Deutschland verbreiteten Kleinbildoptiken aus den 1960er Jahren lässt sich die Aufspaltung des Meteoritenkörpers aber leider nicht beobachten. „Hier sind die tschechischen Kollegen schon weiter", sagt Heinlein, „mit ihren Fisheye-Objektiven konnten sie bereits multiple Meteorspuren fotografieren."

Etwa fünf Sekunden erleuchtete die Sternschnuppe den Himmel, bevor sie unterhalb einer Höhe von 16 Kilometern in den so genannten Dunkelflug überging. Er kann je nach der Fragmentmasse mehrere Minuten dauern. Das größte Bruchstück, nach dem immer noch gefahndet wird, brauchte etwa neunzig Sekunden, um den Boden zu erreichen. Es wird an der Südflanke des Hohen Straußberges nahe Füssen vermutet. Heinlein schätzt seine Masse auf fünfzehn Kilogramm. Fast doppelt so lange dürfte das nur gut ein Zehntel so schwere Neuschwanstein-Fragment gebraucht haben. Mit rund 200 Stundenkilometern traf es die Schneedecke 1600 Meter hoch auf der Altenberg-Alm bei Füssen.

Die sieben Fotos, auf denen der Meteor am besten zu sehen war, wurden am Ondrejov-Observatorium bei Prag ausgewertet. Eine Woche dauerte die akribische Vermessung der Spuren anhand der Sternpositionen. Mit den Resultaten gelang die Berechnung der Flugbahn des Steinbrockens vor seiner unsanften Begegnung mit der Erde. „Der Körper umrundete die Sonne auf einem exzentrischen Orbit mit einer großen Halbachse von 2,4 Astronomischen Einheiten", erklärt Pavel Spurny, der in Ondrejov die Berechnungen leitete. Das sei nichts Ungewöhnliches bei Meteoren, die tief in die Erdatmosphäre eindringen und Meteorite produzieren. Die sonnenfernen Regionen der Bahn reichten bis in den Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter, der sonnennächste Punkt lag etwas außerhalb der Venusbahn.

Überraschung beim Bahnvergleich

In anderer Hinsicht gab es allerdings eine große Überraschung. Sie zeigte sich beim Vergleich der Bahndaten mit denen des Pribram-Meteoriten, der im Jahr 1959 fotografiert und in der Tschechoslowakei geborgen worden war. Spurny: „Die beiden haben fast identische Orbits. Es gibt keinen Zweifel, dass sie denselben Ursprung haben."

Bereits seit den 1980er Jahren waren Bahnähnlichkeiten von Meteoren Anlass zu der Vermutung, dass es analog zu den bekannten Meteorströmen auch Asteroiden-Ströme geben könnte. Sie sollten aus zerbrochenen Kleinplaneten stammen, die sich im Laufe der Zeit entlang der Umlaufbahn verteilen. Meteorströme bestehen dagegen aus Kometenmaterial. Mit dem neuen Fund sei ein „wichtiger Beweis für die Existenz von Asteroiden-Strömen erbracht", bekundete Spurny auf der Berliner Konferenz.

Auch die Einschlagstelle ließ sich mit den tschechischen Bahnrechnungen präzise ermitteln: Der Himmelsstein fand sich nur 400 Meter abseits der errechneten Flugbahn eines hypothetischen Zwei-Kilogramm-Fragmentes.

„Er gehört sehr wahrscheinlich zu den gewöhnlichen Chondriten, der häufigsten Meteoritenklasse", vermutet Jürgen Oberst vom Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung des DLR in Berlin. Ihren Namen haben sie von kleinen silikatischen Einschlüssen. Diese „Chondren" bestehen aus einer Art verfestigtem „solaren Schlamm": abgekühlter, kondensierter Sonnenmaterie, allerdings mit sehr viel geringeren Anteilen von flüchtigen Substanzen wie Wasserstoff, Helium oder Stickstoff.

Als Chondrit würde der Meteorit von Neuschwanstein von einem relativ kleinen Mutterkörper stammen, der nicht die schwerkraftbedingten Schmelzprozesse der terrestrischen Planeten und größeren Asteroiden durchmachte. Deshalb wurden die metallischen und silikatischen Anteile des Mutterkörpers – anders als bei der Erde mit ihrem metallischen Kern und silikatischen Mantel – nicht getrennt. „Der Stein ist undifferenziert", ist sich Oberst fast sicher und schätzt den Eisengehalt auf zehn Prozent – genug, dass der Meteorit von Magneten angezogen wird. Rostspuren an seiner Oberfläche künden ▶

von den drei Monaten unter feuchten bayrischen Witterungsbedingungen.

Als Nächstes sollen Messungen der Reststrahlung des Steins seine Aufenthaltsdauer im All enthüllen. Nachdem er durch Kollisionen mit anderen Objekten von seinem Mutterkörper abgespalten worden war, prasselten während seines langen Irrflugs im Weltraum unablässig kosmische Strahlungsteilchen auf ihn ein und erzeugten durch Reaktion mit vorhandenen Atomkernen radioaktive Isotope, deren Konzentration sich aus der Energieverteilung der Reststrahlung erschließen lässt. Die Menge dieser nachträglich erzeugten instabilen Kerne liefert Hinweise darauf, wie lange der Brocken der kosmischen Strahlung ausgesetzt war. Die Untersuchungen finden im Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg statt. „Wir können so die Hauptkollisionsereignisse datieren und auch die Größe des Mutterkörpers abschätzen“, erklärt Oberst, der auf einen Vergleich mit den Daten des Pribram-Steins gespannt ist. „Erstmals sind zwei unabhängig gefundene Exemplare aus demselben Asteroiden-Strom für eine vergleichende Laboruntersuchung zugänglich.“ ■

Thorsten Dambeck *ist promovierter Physiker und arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.*

NANOMASCHINEN

Ein lichtgetriebener Molekülmotor

Durch Verschmelzung von Kraftmikroskopie und organischer Chemie ist es erstmals gelungen, eine künstliche molekulare Maschine zu schaffen, die Licht in Bewegung umsetzt.

Von Markus Seitz, Thorsten Hugel und Hermann E. Gaub

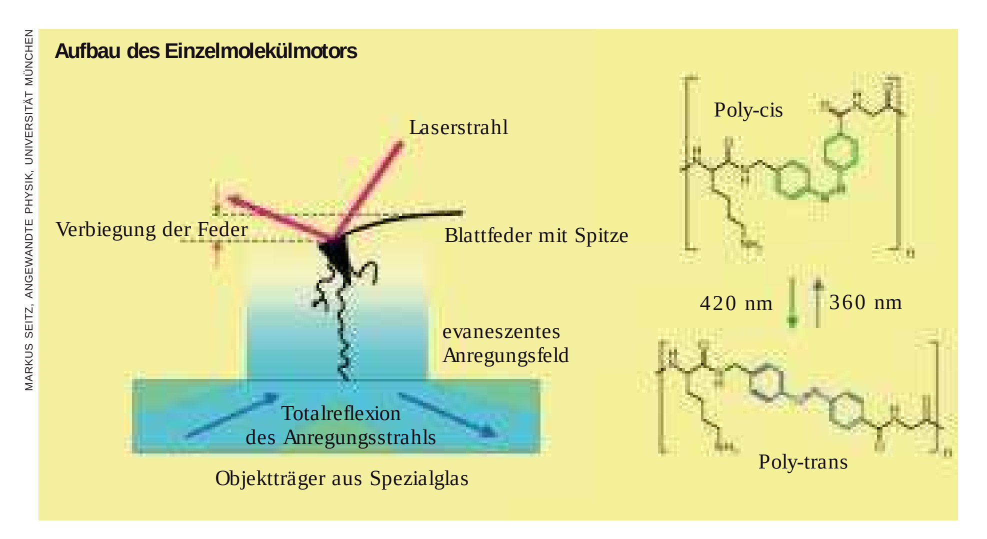
Technologischer Fortschritt war in den letzten Jahrzehnten vielfach ein Synonym für Miniaturisierung. Sie sorgte für immer schnellere Schaltkreise, höhere Leistungen und geringeren Verbrauch von Ressourcen. Inzwischen nähert sich diese Entwicklung mit Riesenschritten Dimensionen, bei denen Funktionseinheiten und Bauelemente nur mehr aus einzelnen Molekülen bestehen. Wir befinden uns an der Schwelle zum Reich der Nanotechnologie.

In ihr ist die Natur schon lange Meister. Die Erbsubstanz DNA, Enzyme und andere Proteine bilden in einem äußerst effizienten, aber auch hochkomplexen Zusammenspiel eine molekulare Maschinerie, die sogar in der Lage ist, sich selbst zu kopieren und im Laufe der Evolution weiter zu optimieren. Sie für nanotechnologische Zwecke zu nutzen liegt daher nahe. Wissenschaftler arbeiten weltweit intensiv daran – mit einigem Erfolg.

Künstliche, von Menschenhand entworfene molekulare Maschinen zu kreieren ist dagegen immer noch eine gewaltige Herausforderung. Auch hier kann es nicht schaden, sich von der Natur inspirieren zu lassen. So weiß man eine Menge über Bewegungsvorgänge einzelner Biomoleküle und kennt die physikalisch-chemischen Prinzipien, die dahinter stecken. Beispielsweise geht Retinal, die lichtempfindliche Komponente des Sehpigments Rhodopsin in der Netzhaut, bei Lichteinfall aus einer geknickten in eine gestreckte Form über. Bei dieser so genannten Cis-trans-Umwandlung setzt das Biomolekül die Energie eines Photons innerhalb weniger billionstel Sekunden in eine atomare Bewegung um.

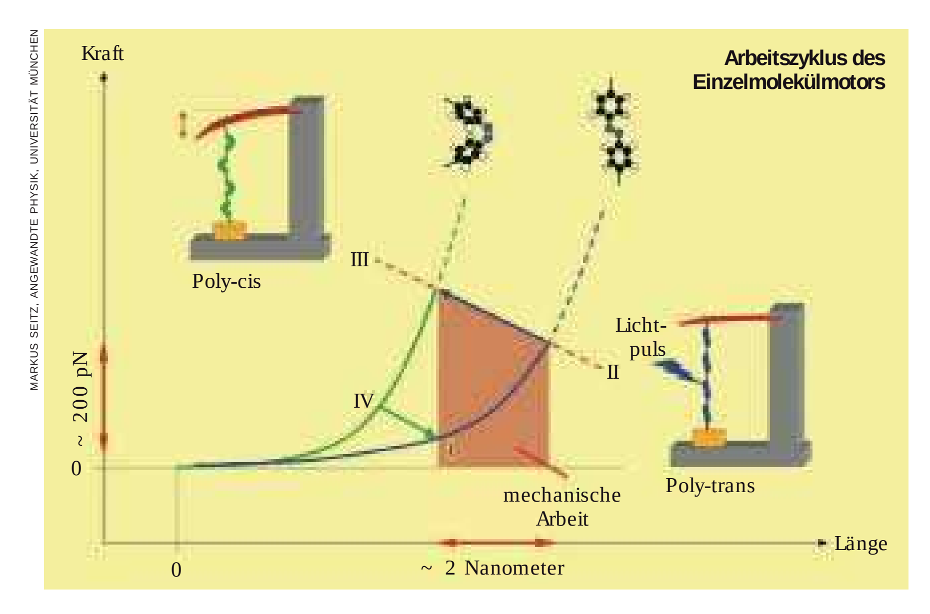
Es klingt verlockend, diesen Vorgang sowohl zur Steuerung als auch zum Antrieb künstlicher Molekülmotoren zu nutzen. Allerdings ist das Retinal selbst zu kompliziert aufgebaut und zu empfindlich. Das künstlich hergestellte Molekül Azobenzol dagegen kann ebenfalls bei Bestrahlung in einer reversiblen Cis-trans-Umlagerung seine Gestalt und damit zugleich seine Länge ändern, ist aber wesentlich stabiler. Luis Moroder und Dieter Oesterhelt vom Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried gelang es schon vor einiger Zeit, Azobenzol-Moleküle zu langen fadenförmigen „Polymeren“ zu verknüpfen, in denen die photoaktiven Einheiten wie Perlen auf einer Schnur aneinander gereiht sind.

Ein solches Polymer kann ebenfalls reversibel zwischen einer langen Poly-trans- und einer kurzen Poly-cis-Form hin- und hergeschaltet werden – und zwar selektiv je nach Wellenlänge des Anregungslichts. Solche lichtinduzierten Gestaltänderungen von Azobenzol und anderen photoaktiven Molekülen werden schon seit längerem beispielsweise für optische Speichermaterialien genutzt. ▶



MARKUS SEITZ, ANGEWANDTE PHYSIK, UNIVERSITÄT MÜNCHEN

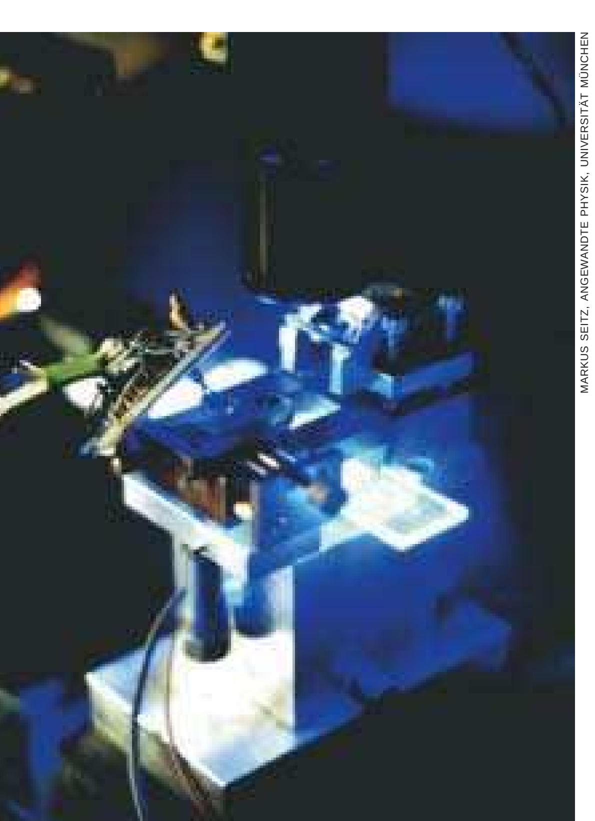
Der Einzelmolekülmotor (links) arbeitet mit einem Polymer aus Azobenzol-Einheiten (rechts). Diese gehen bei Bestrahlung mit UV-Licht von der linearen „trans“-Form zur gewinkelten „cis“-Konfiguration über. Dadurch verkürzt sich die Polymerkette. Bei Bestrahlung mit violettem Licht streckt sie sich wieder. Ein einzelner Polymerfaden ist zwischen der Spitze eines Kraftmikroskops und einem Glasplättchen eingespannt. Ein Laserstrahl, der am inneren Rand des Plättchens totalreflektiert wird, erzeugt dahinter ein „evaneszentes“ Lichtfeld, das den Polymerfaden schaltet.



MARKUS SEITZ, ANGEWANDTE PHYSIK, UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Im Arbeitszyklus wird der entspannte Molekülfaden im Poly-trans-Zustand (I) zunächst gestreckt (II) und dann mit UV-Licht in die Poly-cis-Form umgewandelt. Dabei verkürzt er sich gegen die anliegende mechanische Kraft von einigen hundert Piconewton (pN) und verbiegt die Blattfeder um einige Nanometer (III). Nachdem er durch Annähern der Federspitze an das Glasplättchen entspannt worden ist (IV), bringt ihn ein violetter Lichtpuls in die Poly-trans-Form zurück. Mechanisch genutzt wird die optische Anregungsenergie im dritten Schritt.

Dagegen ist es bisher nicht gelungen, die mechanische Antwort eines einzelnen Moleküls für einen Motor auszunutzen oder auch nur die beim Verkürzen verrichtete Arbeit zu messen oder zu speichern. Das liegt daran, dass eine geeignete Apparatur dafür alles andere als leicht zu konstruieren ist. Bei unseren Versuchen griffen wir auf das Einzelmolekül-Kraftspektroskop zurück, mit dem sich in den vergangenen zehn Jahren schon wertvolle Informationen über die Mechanik einzelner Moleküle gewinnen ließen. Es besteht im Wesentlichen aus einer sehr feinen, wenige Mikrometer großen Blattfeder, die auf etwa einen zehntel Nanometer genau bewegt werden kann. Ihre Verbiegung lässt sich mit einem Laserstrahl ermitteln, der von ihrer verspiegelten Rückseite reflektiert wird. Auf diese Weise gelingt es, je nach Steifigkeit der verwendeten Feder Kräfte von wenigen billionstel Newton (Piconewton) zu messen. Das entspricht einem Gewicht von weniger als einem milliardstel Gramm.



MARKUS SEITZ, ANGEWANDTE PHYSIK, UNIVERSITÄT MÜNCHEN

So sieht der lichtgetriebene Einzelmolekülmotor als Labormodell aus.

Licht bewegt eine Feder

Allerdings ist der gesamte Aufbau extrem empfindlich gegenüber äußeren Einflüssen. Insbesondere können die Lichtpulse, welche die Polymerfäden zur Gestaltänderung anregen, auch von sich aus schon die Blattfeder verbiegen. Um diese Störung zu vermeiden, koppelten wir den Lichtstrahl in einer bestimmten Geometrie so in einen Objektträger aus Spezialglas ein, dass er an der inneren Glasoberfläche totalreflektiert wurde und lediglich direkt dahinter ein zur Blattfeder hin rasch abfallendes „evaneszentes“ Feld erzeugte. Dieses reichte aus, um die Polymerfäden in unmittelbarer Nähe der Oberfläche anzuregen, während der Einfluss des Lichts auf die Blattfeder selbst vernachlässigbar blieb.

Für unseren Versuch klebten wir die photoaktiven Polymermoleküle der Martinsrieder Kollegen durch eine geeignete chemische Reaktion mit einem Ende an die Federspitze. Diese brachten wir dann dicht an den Objektträger und warteten einige Sekunden, bis das zweite Ende eines einzelnen Polymerstrangs eine chemische Bindung mit der eigens dafür vorbehandelten Glasoberfläche einging. Die Apparatur war so empfindlich, dass wir direkt überprüfen konnten, ob tatsächlich genau ein Molekül zwischen Blattfeder und Objektträger eingespannt war.

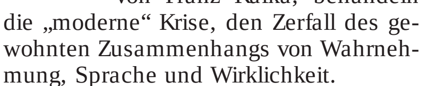
Durch Bestrahlen mit Licht unterschiedlicher Wellenlänge brachten wir das Azobenzol-Polymer schließlich dazu, abwechselnd zu schrumpfen oder sich zu strecken (Bild oben). Das Fadenmolekül verkürzte sich sogar dann noch, wenn es um mehrere hundert Piconewton vorgespannt war. Es verbog die Blattfeder um einen Betrag, der dem Bewegen eines Gewichts von etwa zehn milliardstel Gramm um zwei millionstel Millimeter entsprach. Danach entspannten wir das Molekül wieder, indem wir den Abstand zwischen Blattfeder und Unterlage verringerten, und schalteten es optisch in die gestreckte Form zurück.

Auf diese Weise wandelte das Azobenzol-Polymer im zyklischen Betrieb wie ein kleiner Motor den Treibstoff Licht in mechanische Arbeit um und versetzte so die Blattfeder in Bewegung. Zwar ging bei unserer experimentellen Anordnung insgesamt noch der größte Teil der Lichtenergie verloren. Dennoch konnten wir demonstrieren, dass eine opto-mechanische Energieumwandlung prinzipiell mit sehr hoher Effizienz möglich ist.

Mit diesem Experiment sind wir bis an die Grenze der denkbaren Miniaturisierung von mechanischen Geräten vorgestoßen. Ob und in welcher Form unser lichtgetriebener Nanomotor praktisch einsetzbar ist, müssen weitere Untersuchungen zeigen. Dennoch wurde ein Meilenstein erreicht: der Anschluss des molekularen Reichs an die für die technische Nutzung relevante makroskopische Welt. Ein einzelnes Molekül hat eine Feder bewegt, die mit der Lupe noch erkennbar ist! Damit wird nicht nur denk- ▶

Muss Musil modern?

In seinem jüngsten Buch „Sieben Wegbereiter“, das soeben bei DVA erschienen ist, unternimmt Marcel Reich-Ranicki – dank unentwegter Fernsehpräsenz populärster deutscher Literaturkritiker – den Versuch, den bislang als Klassiker der Moderne anerkannten Schriftsteller Robert Musil posthum als „gehässigen“ Neidhammel und „schamlosen“ Plagiator zu entlarven. In der auf den ersten Blick unbegreiflichen Verunglimpfung offenbart sich bei näherem Hinsehen Reich-Ranickis pauschale Allergie gegen jede „moderne“ Literatur. Denn dieser Kritiker verabscheut seit jeher alle Texte, die dem Umstand Rechnung tragen, dass eine von moderner Technik und Naturforschung revolutionierte Wirklichkeit sich nicht mehr mit den literarischen Mitteln des 19. Jahrhunderts beschreiben lässt. Darum mag die Leichenschändung auch ein Nachgehakt in dieser Zeitschrift verdienen.


AKG

Verunglimpfter Autor: Robert Musil

Musil war zunächst Naturwissenschaftler; er studierte Physik und promovierte in Psychologie über den Physiker und Philosophen Ernst Mach. Musils Hauptwerk, der unvollendete Roman „Der Mann ohne Eigenschaften“, umkreist mit einem funkelnden Figurenreigen das „moderne“ Epochenproblem, das sich zu Beginn des 20. Jahrhunderts gebieterisch stellte: Wie lebt es sich in einer Welt, die durch beschleunigten technischen Wandel und Schwindel erregende Umwälzungen des wissenschaftlichen Weltbilds aus den Fugen gerät, während Gefühl, Moral, Politik und „Seele“ im Postkutschenzeitalter verharren?

Schon im ersten Absatz des „Mann ohne Eigenschaften“ wird dieses Thema leichthin angeschlagen und von da an durch die Romangestalten vielstimmig variiert. Diese Melodie ist auch Reich-Ranicki nicht ganz entgangen. Doch in völliger Verkennung der ironischen Haltung Musils zum so genannten wissenschaftlichen Fortschritt konstatiert der rasende Kritiker: „Sein naiver Glaube an die Erlösung der Menschheit durch die exakten Wissenschaften, der ihn ja in seinen frühen Jahren bezaubert hatte, ließ mit der Zeit keineswegs nach.“

Vom Großkritiker weithin unbemerkt, widmet sich ein „moderner“ Strang der Literatur schon seit langem dem Problem, wie eine Welt zu beschreiben sei, die sich immer weniger dem Augenschein und der Alltagssprache erschließt, dafür desto mehr der Methodik einer Naturerforschung, die ihre Resultate letztlich nur in der Sprache der Mathematik zu formulieren vermag. Schon im 18. Jahrhundert schrieb der Physiker Lichtenberg darüber ironische Gedankensplitter in seine „Sudelbücher“, darunter den gegen alle Augenscheindenker gerichteten Satz „Die Hauptsache ist immer unsichtbar“.

Im 19. Jahrhundert schilderte Georg Büchner – er verfasste eine wissenschaftliche Arbeit über das Nervensystem der Fische – etwa in der verblüffend „modernen“ Erzählung „Lenz“, wie seinen Personen der naive Bezug zwischen Bewusstsein und Realität verloren geht. Und Zeitgenossen Musils wie Hugo von Hofmannsthal im „Lord-Chandos-Brief“, Rainer Maria Rilke in der Erzählung „Malte Laurids Brigge“, ganz zu schweigen von Franz Kafka, behandeln die „moderne“ Krise, den Zerfall des gewohnten Zusammenhangs von Wahrnehmung, Sprache und Wirklichkeit.

Der auf traditionelle Vollbluterzähler abonnierte Großkritiker tadelt die „Unanschaulichkeit der Sprache Musils“ als Kunstfehler. Der posthume Verriss gipfelt darum in der Behauptung: „Die Wahrheit ist: ‚Der Mann ohne Eigenschaften‘ war misslungen und Musil tatsächlich ein ganz und gar gescheiterter Mann.“

Zum Beweis berichtet Reich-Ranicki, Musil habe seinen prominenten Zeitgenossen wie Thomas Mann den literarischen Erfolg missgönnt; denn er selbst lebte, während er, „vom mehr oder weniger manischen Sendungsbewusstsein geblendet“, an seinem Hauptwerk schrieb, in einer „ärmlichen Wohnung ohne fließendes Wasser“. Noch viel schwerer wiegt Reich-Ranickis Vorwurf, Musil habe an allzu vielen Einfällen gelitten: Es sei „gerade die Fülle der Details, der Einfälle, die Musils Werk so fragwürdig macht“.

Vor allem aber sei Musil so ganz und gar nicht modern – „... nur da, wo er ... traditionell erzählt, gelingen ihm Kapitel von beachtlicher oder gelegentlich auch hoher Qualität“. Insbesondere sei ein vermeintliches „Hauptstück des Romans“, der Inzest der Geschwister, ein alter Hut: „Gerade diesem Handlungsstrang lässt sich schwerlich Modernität und auf keinen Fall Originalität nachrühmen. Der Inzest ist ein Urmotiv, ein ehrwürdiger Topos der Weltliteratur, besonders oft als Versatzstück verwendet ... Im ‚Mann ohne Eigenschaften‘ folgt Musil in dieser Hinsicht ganz und gar der Tradition, um nicht zu sagen: der Konvention.“

Diese Beweisführung für Musils angebliche Unmodernität ist schon deshalb ohne Substanz, weil die Musil-Forschung heftig darüber streitet, ob der Autor den Inzest im Roman überhaupt vorkommen lassen wollte. Jedenfalls geht der Vorwurf völlig an der Frage vorbei, ob Musil „modern“ ist oder nicht. Musils eigentliches Thema muss einem ja nicht schmecken – Reich-Ranicki mag toben wie der Suppenkaspar –, aber sofern der Begriff der Moderne einen Sinn hat, kreist er über der Kluft zwischen abstrakter Naturwissenschaft und Sinnenwelt, die niemand so umfassend, originell und unterhaltsam ausgeleuchtet hat wie Robert Musil.

Reißwolf Reich-Ranicki hat nie einen Zweifel daran gelassen, dass ihn an der Literatur einzig deren Unterhaltungsfunktion interessiert. Dieses populistische Dogma bläht die Segel seiner enormen Popularität, treibt ihn aber auf seine alten Tage auch in gefährliche Untiefen. Literatur muss nicht immer nur unterhaltsam das bestätigen, was wir schon wussten. Sie darf auch experimentieren, neue Formen erproben, die Welt etwa mit Forscheraugen sehen. Wem diese Anstrengung, die sich zur Unterhaltungsliteratur ähnlich verhält wie die Grundlagenforschung zum marktreifen Produkt, allzu mühsam ist, der muss davon nichts lesen. Wer aber solche Literatur aus dem Kanon der Moderne verbannen möchte, der richtet sich als Kritiker selbst.

Der von Reich-Ranicki zum einsamen End- und Höhepunkt der deutschsprachigen Literatur erhobene Thomas Mann war für Musils Modernität empfänglicher. Über den „Mann ohne Eigenschaften“ urteilte er: „Dies funkelnde Buch, das zwischen Essay und epischem Lustspiel sich in gewagter und reizender Schwebe hält, ist gottlob kein Roman mehr – ist es darum nicht mehr, weil, wie Goethe sagt, ‚alles Vollkommene in seiner Art über seine Art hinausgehen und etwas anderes Unvergleichliches werden muss‘.“

Michael Springer *ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.*



(Seiten 18, 19 und 20: Anzeige und Beihefter)

bar, sondern sogar sehr wahrscheinlich, dass dereinst künstlich hergestellte Moleküle als Komponenten komplizierterer integrierter Systeme fungieren, in denen sie Pumpen und Ventile antreiben, Informationen speichern oder sogar noch komplexere Aufgaben erfüllen. ■

__Markus Seitz__ ist promovierter Chemiker am Lehrstuhl für Angewandte Physik der Universität München (LMU). Der Diplomphysiker __Thorsten Hugel__ fertigt dort seine Doktorarbeit an, und __Hermann E. Gaub__ ist Lehrstuhlinhaber. Alle drei forschen am Center for NanoScience (CeNS) der LMU.

TEILCHENPHYSIK

Ende einer unendlichen Geschichte

Seit 1968 ergaben alle Messungen der Sonnenneutrinos auf der Erde einen zu niedrigen Wert. Jetzt endlich steht fest, dass nicht Ungenauigkeiten im Sonnenmodell oder Messprobleme dahinter stecken, sondern Verwandlungstricks der Neutrinos.

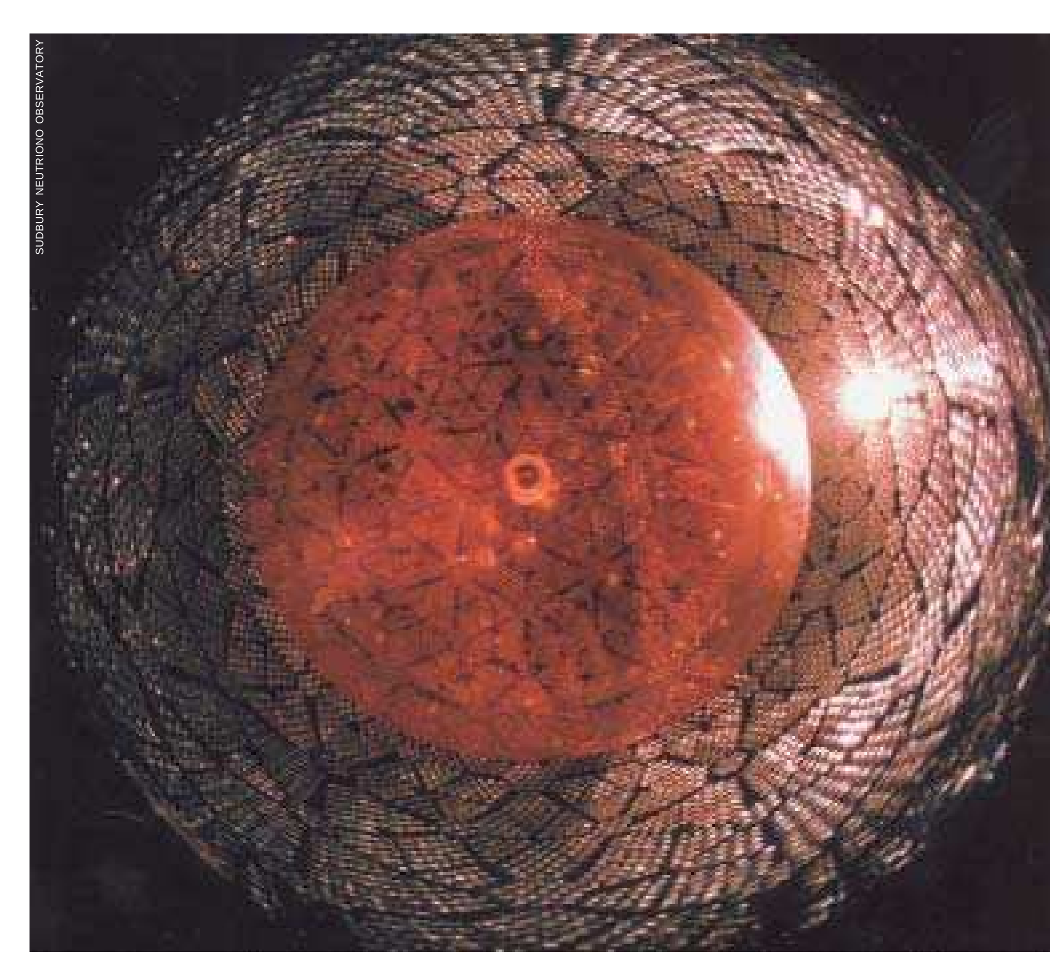
Von Georg Wolschin

Unsere Sonne ist ein gigantischer Brennofen, der seine Energie aus der Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium gewinnt. Schon vor mehr als fünfzig Jahren glaubten die Physiker die Funktionsweise dieses kosmischen Fusionsreaktors ziemlich genau zu verstehen. Dabei zeigten ihre Berechnungen, dass uns die Sonne nicht nur in Licht, sondern auch in einer Flut geisterhafter Teilchen badet, die Materie praktisch ungehindert durchdringen. Diese so genannten Elektron-Neutrinos entstehen bei verschiedenen Teilreaktionen des solaren Fusionsprozesses, sind aber wegen ihrer äußerst geringen Wechselwirkungsneigung nur extrem schwer nachweisbar.

Den ersten Versuch, ihren Fluss von der Sonne zu ermitteln und mit dem theoretisch vorhergesagten Wert zu vergleichen, machten ab 1968 Raymond Davis jr. und Mitarbeiter vom amerikanischen Brookhaven-Nationallaboratorium. In einem unterirdischen Tank mit fast 400 000 Litern Perchlorethylen verfolgten sie die Umwandlung von Chlor-37 in Argon-37. Diese Kern-Reaktion wird allerdings nur durch die relativ energiereichen Neutrinos aus einer Nebenreaktion des solaren Fusionsprozesses ausgelöst: dem Zerfall von Bor-8. Dennoch war das Ergebnis der Messungen für die Sonnenphysiker eine faustdicke Überraschung und ein großes Ärgernis: Davis fand nur etwa ein Drittel des erwarteten Neutrinoflusses.

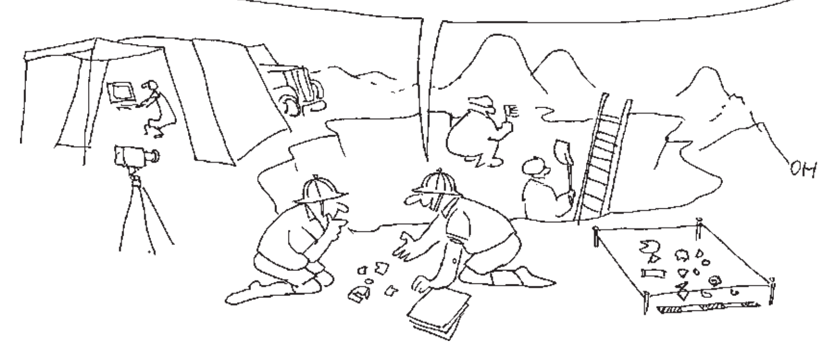
Und dieses Ärgernis sollte für Jahrzehnte bestehen bleiben. Alle folgenden Experimente bestätigten das Defizit, wenngleich teilweise nicht ganz in derselben Höhe. Mit dem europäischen Gallex-Experiment ließen sich 1992 erstmals auch die Neutrinos aus dem Hauptzweig der Fusionskaskade messen, und die richtungsempfindlichen japanischen Detektoren Kamiokande und Superkamiokande zeigten, dass die nachgewiesenen Teilchen tatsächlich von der Sonne kommen. Eine überzeugende Lösung des Rätsels lieferten beide Ergebnisse aber noch nicht; auch hier wurden insgesamt viel zu wenige Neutrinos registriert.

Die Ursache des Problems konnte in Unzulänglichkeiten des Sonnenmodells oder der Teilchentheorien liegen. Im ersteren Fall müsste die Temperatur im Zentrum der Sonne um sechs Prozent unter den berechneten 15,7 Millionen Kelvin liegen. Das wäre jedoch nicht plausibel und ergäbe Widersprüche zu anderen Messdaten, insbesondere den sehr genau ermittelten Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Schallwellen in der Sonne. Deshalb schien von Anfang an die zweite mögliche Ursache wahrscheinlicher: dass ▶



SUDBURY NEUTRIONO OBSERVATORY

Der Detektor des kanadischen Sudbury Neutrino-Observatoriums besteht aus einem kugelförmigen Tank mit 1000 Tonnen schwerem Wasser (Bildmitte) in einem über 2000 Meter tiefen Bergwerkstollen. Er ist umgeben von 7000 Tonnen normalem Wasser als zusätzlicher Abschirmung. Die solaren Neutrinos werden über ihre Wechselwirkung mit dem Deuterium des schweren Wassers aufgespürt. Dabei entstehen im Endeffekt Lichtblitze, die mit einer Anordnung aus 9456 Photomultipliern (außen) registriert werden.



sich die Elektron-Neutrinos auf dem Weg vom Sonneninnern zur Erde im Verlauf so genannter Oszillationen in andere Neutrino-Arten (Myon- oder Tau-Neutrinos) umwandeln, auf welche die Detektoren nicht ansprachen. Das bedeutete zugleich, dass sie im Widerspruch zum Standardmodell der Teilchenphysik eine von null verschiedene Ruhemasse haben mussten.

Tatsächlich lieferten Messergebnisse am japanischen Superkamiokande-Detektor 1998 deutliche Hinweise auf Neutrino-Oszillationen (Spektrum der Wissenschaft 8/1998, S. 14). Allerdings betrafen diese Resultate zunächst nicht die solaren, sondern die wesentlich energiereicheren „atmosphärischen“ Neutrinos, die bei Wechselwirkungen der kosmischen Strahlung mit der irdischen Lufthülle entstehen. Am kanadischen Sudbury-Neutrino-Observatorium SNO gelang 2001 dann auch der Nachweis, dass sich zumindest jene solaren Elektron-Neutrinos, die aus dem Zerfall von Bor-8 stammen, in Myon- oder Tau-Varianten umwandeln können (Spektrum der Wissenschaft 10/2001, S. 12). Allerdings mussten für dieses Ergebnis Präzisionsdaten vom japanischen Superkamiokande-Detektor zum Vergleich herangezogen werden. Dies war ein Manko; denn Messungen mit zwei unterschiedlichen experimentellen Anordnungen an verschiedenen Orten sind möglicherweise nicht vollständig kompatibel.

Jetzt hat die SNO-Kollaboration um Art McDonald neue Resultate vorgelegt, die den Schluss auf Neutrino-Oszillationen ermöglichen, ohne dass die japanischen Daten als Vergleichsmaßstab benötigt werden. Sie wurden als ein Höhepunkt der Neutrinokonferenz im Mai in München der Öffentlichkeit vorgestellt und sind inzwischen in der Fachzeitschrift „Physical Review Letters“ erschienen (Bd. 89, Nr. 011301).

Der SNO-Detektor befindet sich in einem über 2000 Meter tiefen Bergwerkstollen und besteht aus einem kugelförmigen Tank mit 1000 Tonnen schwerem Wasser (D_2O), umgeben von 7000 Tonnen normalem Wasser (H_2O) als zusätzlicher Abschirmung. Die solaren Neutrinos werden über ihre Wechselwirkung mit dem Deuterium des schweren Wassers aufgespürt. Zuerst betrachteten die Forscher eine Reaktion, in deren Verlauf das einfallende Neutrino das Deuterium in zwei Protonen und ein Elektron aufspaltet. Dieses lässt sich nachweisen, weil es sich anfangs schneller als Licht in Wasser bewegt und deshalb so genannte Tscherenkow-Strahlung aussendet, die mit einer Anordnung aus 9456 Photomultipliern registriert wird. Die Aufspaltung von Deuterium in zwei Protonen und ein Elektron findet allerdings nur mit Elektron-Neutrinos statt, nicht mit den Myon- und Tau-Varianten.

Das Neutrino-Defizit verschwindet

Deshalb betrachteten die SNO-Forscher nun zusätzlich eine zweite Reaktion. Dabei wird das Deuterium von einem Neutrino in ein Proton und ein Neutron zerlegt. Letzteres reagiert dann seinerseits mit einem anderen Deuterium zu Tritium (überschwerem Wasserstoff). Zugleich entsteht ein Lichtquant einer charakteristischen Wellenlänge von 198 Nanometern, das zum Nachweis dient.

Diese Detektionsmethode ist zwar etwas umständlich und wird durch den Zerfall natürlicher radioaktiver Substanzen wie Wismut-214 und Thallium-208 aus den Uran- und Thorium-Zerfallsketten in den Detektormaterialien erschwert, bei dem in schwerem Wasser ebenfalls freie Neutronen entstehen. Dennoch hat sie einen ganz entscheidenden Vorteil: Sie spricht auf Neutrinos aller drei Sorten gleichermaßen an. Der Vergleich der damit erhaltenen Werte mit denen der früheren Messung, die nur Elektron-Neutrinos erfasste, sollte also die Frage eindeutig beantworten, ob Oszillationen bei den Sonnenneutrinos stattfinden.

Und die Antwort ist ein klares Ja. Bei einer Messzeit von 306 Tagen ermittelten die SNO-Forscher für Neutrinos aus dem Zerfall von Bor-8 einen hochgerechneten Wert von 5,09 Millionen Teilchen pro Quadratzentimeter und Sekunde. Innerhalb der systematischen und statistischen Fehlergrenzen stimmt er sehr gut mit den 5,05 Millionen überein, die sich aus dem Standard-Sonnenmodell bei einer unveränderten Zentraltemperatur von 15,7 Millionen Kelvin ergeben. Damit hat erstmals eine Messung kein Defizit an Sonnenneutrinos ergeben. Noch genauere Resultate verspricht man sich vom jüngsten SNO-Experiment, das bereits seit Juni 2001 läuft. Dabei wird das schwere Wasser mit Kochsalz (Natriumchlorid) versetzt. Da Chlor-35 die bei der Neutrino-Reaktion freigesetzten Neutronen wirksamer einfängt als Deuterium, entstehen noch mehr nachweisbare Lichtquanten, und die Fehlerschranken werden sich weiter verkleinern lassen.

Hinsichtlich der Oszillationen ist das Ergebnis der Kanadier jedoch jetzt schon überzeugend. Mit ihrer früheren Messmethode haben die SNO-Forscher einen Fluss von 1,76 Millionen Elektron-Neutrinos pro Quadratzentimeter und Sekunde aus dem Zerfall von Bor-8 entdeckt. Der neue Wert für sämtliche Neutrino-Arten von 5,09 Millionen Teilchen pro Quadratzentimeter und Sekunde ist 2,89-mal so groß. Unter der naiven Annahme, dass sich die drei Neutrino-Sorten maximal mischen und somit eine Gleichverteilung zwischen ihnen entsteht, wäre der Faktor drei zu erwarten.

Tatsächlich sind Mechanismus und genaues Ausmaß der Mischung noch nicht völlig klar. Über diese Frage wurde auf der Neutrinokonferenz ausführlich diskutiert; sie wird sich nur durch weitere Experimente mit neuen Detektoren beantworten lassen. Mit dem endgültigen Nachweis der Oszillationen bei Sonnenneutrinos aber ist ein störender Fleck im physikalischen Weltbild nach Jahrzehnten endlich aus der Welt geschafft. ■

Georg Wolschin *ist theoretischer Physiker und Wissenschaftsjournalist; er lehrt an der Universität Heidelberg.*

Maus mit Menschenhirn

Wir Menschen verdanken unsere Intelligenz unserem relativ großen Gehirn und vor allem der stark gefalteten Hirnrinde. In diesem so genannten Cortex finden die Denkprozesse statt. Dank der Faltung ist seine Oberfläche beim Menschen tausendmal größer als bei der Maus. Wie kam es zu dieser dramatischen Zunahme? Anjen Chen und Christopher A. Walsh haben nun einen verblüffenden Hinweis gefunden. Durch Änderung nur eines Gens erhielten sie Mäuse mit stark vergrößertem Gehirn. Zudem ist der Cortex der Tiere, wie der abgebildete, mit Cresylviolett angefärbte Schnitt (oben) im Vergleich mit der Hirnrinde einer normalen Maus (rechts) zeigt, ähnlich wie beim Menschen gefaltet. Durch die Mutation reichert sich ein allgegenwärtiges Protein namens Beta-Catenin im embryonalen Mäusehirn an und sorgt dafür, dass ungewöhnlich viele neuronale Vorläuferzellen entstehen. Ob die Tiere mit menschenähnlichem Cortex auch intelligenter sind, wurde noch nicht getestet.



ANJEN CHEN

GESELLSCHAFT

Ware Mensch – die neue Sklaverei

Auf ihrem Bett in einem Auffanglager für Flüchtlinge in Skopje (Mazedonien) sitzt die 24-jährige Tanja. Sie entkam der Prostitution, als Guerillas der ethnischen Albaner die Bar stürmten, in der sie, wie sie selbst sagt, als Sklavin gehalten wurde. Nun wartet sie auf die Rückkehr in ihr Heimatland Moldawien.

In den Schattenzonen der Weltwirtschaft blüht der Menschenhandel. Trotz internationaler Ächtung werden immer mehr Unschuldige zum rechtlosen Besitz.

Von Kevin Bales

Mit dem Wort Sklaverei verbinden kultivierte Europäer vermutlich Bilder von Menschenmärkten im antiken Rom, von geknechteten Schwarzen auf amerikanischen Baumwollfeldern oder jüdischen Zwangsarbeitern in deutschen Fabriken. Wie weit auch immer der Blick in die Vergangenheit schweift: Sklaverei gilt als überwunden und steht nicht auf der Liste der dringenden Probleme dieser Welt.

In Wirklichkeit grassiert der Menschenhandel wie eine Epidemie, dabei aber oft in einer modernen Form, die meines Erachtens die Bezeichnung „neue Sklaverei“ rechtfertigt: Weit entfernt von jeder Onkel-Toms-Hütte-Romantik sind Menschen heutzutage nicht mehr nur Ware, sondern oft sogar Wegwerfprodukt, das nur einem Zweck dient: dem Profit.

Dabei haben sich durchaus auch traditionelle Formen erhalten, wie die Inderin Meera erfahren musste. Ihr kleines Dorf in den Bergen des Bundesstaates Uttar Pradesh war noch vor drei Jahren ein Dorf von Sklaven. Damals kam zufällig ein Sozialarbeiter vorbei und entdeckte das schreckliche Geflecht erblicher Schuldknechtschaft. Es mag zur Zeit der Großväter oder ihrer Urgroßväter gewesen sein – nur wenige im Dorf konnten sich daran erinnern –, doch irgendwann in der Vergangenheit hatten die Familien Geld leihen müssen, um ihr Überleben zu sichern. Im Gegenzug verpflichteten sie sich zu unbezahlter Arbeit, erhielten künftig lediglich ein paar Rupien, um Reis zu kaufen. Diese „Schuld“ wurde von Generation zu Generation weitervererbt. Fünfjährigen drückten die Gläubiger bereits einen Hammer in die Hand und ließen sie im Steinbruch Felsbrocken zu Sand zermahlen. Staub, umherfliegende Steinsplitter und das Tragen schwerer Lasten machten die Dorfbewohner krank, verursachten Silikose (Staublunge), ruinierten Augen und Rücken.

Der Sozialarbeiter ersann einen radikalen Plan: Wenn sich zehn der Frauen bereit fänden, vom Hungerlohn pro Woche eine Rupie beiseite zu legen, würde er ein Startgeld beisteuern und


ALEXANDER NEMENOV, AFP PHOTO

für die Sicherheit des Ersparten sorgen. Meera gehörte zu den Mutigen. Drei Monate später hatte die Gruppe genug gespart, um sie als Erste auszulösen. Von nun an wurde Meera für ihre Arbeit bezahlt und konnte entsprechend mehr Geld zur gemeinsamen Kasse beisteuern. Acht Wochen später kam die zweite Frau frei, nach weiteren vier die dritte.

Als die übrigen Gruppenmitglieder ihre Freiheit schon in greifbarer Nähe sahen, erklärten sie kurzerhand jegliche Schuld für nichtig. Ihre „Besitzer" ließen sich das nicht gefallen und drohten den Frauen Gewalt an, doch vereint hatten diese den Mut zu widerstehen. „Ihr könnt mich töten, aber nicht wieder in die Sklaverei zwingen", verkündete eine von ihnen. Als sie aus den Steinbrüchen verjagt wurden, suchten die Frauen bezahlte Arbeit. Bald formierten sich neue Gruppen, um die Freiheit zu erlangen. Ich hatte Gelegenheit, den Sozialarbeiter zweimal in Meeras Dorf zu begleiten; beim zweiten Besuch waren alle Einwohner frei und die Kinder gingen zur Schule.

Nicht immer finden solche Aktionen ein glückliches Ende. Kaum hundert Kilometer von Meeras Ort entfernt lebt der Inder Baldev, auch er ein Sklave in Schuldknechtschaft. Als ich ihn 1997 zum ersten Mal traf, pflügte er gerade das Feld seines Herrn. Der nannte ihn „mein *Halvaha*", das bedeutet: „mein Pflugknecht". Zwei Jahre später traf ich Baldev wieder und erfuhr, dass er dank einer unerwarteten Erbschaft seine Schulden begleichen konnte. „Wir waren frei, alles zu tun, was wir wollten. Aber ich hatte nur noch Sorgen – was, wenn eines unserer Kinder krank würde? Wenn wir eine schlechte Ernte hätten oder die Regierung Geld von mir wollte? Der *Landlord* hatte uns jeden Tag Essen gegeben, jetzt nicht mehr. Nach einiger Zeit ging ich zu ihm und bat, mich wieder aufzunehmen. Ich musste kein Geld von ihm leihen, ich durfte auch so wieder sein *Halvaha* sein. Jetzt mache ich mir viel weniger Sorgen, denn ich weiß, was ich zu tun habe." Ohne finanzielle Unterstützung und ohne die Hilfe eines Sozialarbeiters sah sich Baldev den Anforderungen der Freiheit nicht gewachsen. Der einzige Vorteil, den er aus der Situation ziehen konnte, war: Seine Kinder müssen keine Erbschuld abtragen.

Standortvorteil Sklaverei

Es mag viele Leser überraschen, Schuldknechtschaft und andere Formen der Sklaverei auch im 21. Jahrhundert anzutreffen. Schließlich ist der Besitz von Menschen weltweit verboten. Und doch gibt es in zahlreichen Ländern Sklaven wie Baldev, die mit Leib und Leben einem anderen gehören. Ihre Zahl kann nur geschätzt werden – anhand der Zusammenschau zahlreicher Berichte staatlicher und nichtstaatlicher Organisationen gehe ich von weltweit etwa 27 Millionen Sklaven aus (siehe Karte Seite 28/29). Schätzungen der Vereinten Nationen zufolge werden etwa vier Millionen Menschen alljährlich von organisierten Banden in andere Länder verkauft; der Reingewinn dieser Unternehmungen dürfte bei rund sieben Milliarden Euro liegen.

Die meisten Sklaven gibt es in der Dritten Welt, wo Armut, Hunger und eine stetig wachsende Bevölkerung den Wert des Individuums mindern. Zudem begünstigen gesellschaftliche Normen und Traditionen dort oft den Menschenbesitz. Indirekt betrifft die zunehmende Sklaverei in Entwicklungsländern meines Erachtens auch uns Bürger westlicher Industrienationen. Wenn multinationale Konzerne Produktionsstätten in Billiglohnländer verlegen, dann verdanken sie die niedrigen Standortkosten dort vermutlich oft auch der Sklavenarbeit: Leibeigene produzieren billigen Reis für die Arbeiter der Chip- oder Bekleidungsfabriken, unfreie Prostituierte dienen ihnen als Konsumgut. Allerdings gibt es zu diesem Aspekt der Globalisierung noch keine Daten.

Doch selbst in Europa gibt es den Menschenhandel über Staatsgrenzen hinweg, von Schleuserbanden mit Profit betrieben. In der Hoffnung auf ein besseres Leben haben viele Opfer sogar teuer für den Schleuserdienst bezahlt, werden aber im Ankunftsland zur Prostitution gezwungen. Eine andere Spielart kennen wir aus England und Frankreich: Betuchte Familien aus Ländern, in denen Sklaverei praktiziert wird, bringen „Hausbedienstete" mit nach Europa, die hier den Launen und Schlägen ihrer Herrschaft ausgesetzt sind, bis sie aktenkundig und befreit werden. Das Schicksal all dieser Menschen hat staatliche und ▶

Literaturhinweise

der überblick, Heft 1/2002. Dammtorstr. 21a (Hof), Postfach 305590, 20317 Hamburg

Die neue Sklaverei. Von Kevin Bales. Antje Kunstmann Verlag, München 2001.

Global Human Smuggling: Comparative Perspectives. Von David Kyle und Rey Koslowski (Hgg.). Johns Hopkins University Press, 2001.

Ending Slavery. Hierarchy, Dependency and Gender in Central Mauretania. Von U. P. Ruf. Transcript Verlag, 1999.

Links zum Thema bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis“*

nichtstaatliche Organisationen auf den Plan gerufen, unter anderem den Vatikan, die Vereinten Nationen, die Internationale Organisation für Migration (IOM) und Amnesty International. Die Regierung der USA bündelte vor zwei Jahren ihre Aktivitäten im Kampf gegen den illegalen Menschenhandel in einer zentralen Koordinationsstelle. An den Universitäten haben sich Sozialwissenschaftler des Themas angenommen und ersetzen die eher anekdotenhaften Reportagen von Journalisten durch fundierte Studien. Urs Peter Ruf von der Universität Bielefeld beispielsweise dokumentierte die Entwicklung der Sklave-Herr-Beziehungen im heutigen Mauretanien (Interview Seite 30/31). Louise Brown von der Universität Birmingham (England) beleuchtet die Situation von zur Prostitution gezwungenen Frauen in Asien. David Kyle von der Universität Kalifornien in Davis widmet sich zusammen mit Rey Koslowski von der Rutgers-Universität der Soziologie des Menschenschmuggels. Ich selbst arbeite an einer Theorie der globalen Sklaverei.

Häufig werde ich gefragt, ob die beschriebenen Praktiken denn tatsächlich als Sklaverei gelten sollen und nicht als eine Form extremer Ausbeutung. Darauf gibt es eine klare Antwort: Sklaverei bedeutete schon immer den totalen Entzug der Willens- und Wahlfreiheit unter Androhung von Gewalt, ob diese vom Sklavenhalter ausging oder vom Staat. Und genau diese Zustände treffen wir heute an. Einem Arbeiter auf der untersten Sprosse der ökonomischen Leiter mögen nicht viele Optionen offen stehen, doch eine bleibt ihm meist noch: Er kann ungestraft davonlaufen.

Zu den Kennzeichen der Sklaverei gehören auch ihre psychologischen Folgen für die Opfer. Selbst wenn keine Prügel oder andere körperliche Folter das Opfer unterwerfen, erlebt es eine derartige Erniedrigung, dass viele ehemalige Sklaven in der Freiheit gar nicht mehr lebensfähig sind. „Ich habe zuvor in Gefängnissen und mit Opfern häuslicher Gewalt gearbeitet, aber das war weit harmloser“, erklärt die amerikanische Psychiaterin Sydney Lytton, die befreite Sklaven betreut.



Die 13-jährige Akuac Malong (links) macht sich auf den Weg in ihr Heimatdorf Madhol im südlichen Sudan. Nach eigenen Angaben hatte man sie vor sieben Jahren gekidnappt und in den Norden des Landes verschleppt. Dort musste sie als Haussklavin arbeiten.

JEAN-MARC BOUJU, AP PHOTO

Sklaverei ist zwar ein universelles, aber kein einheitliches Phänomen; an jedem Ort und zu jeder Zeit nimmt sie verschiedenartige Erscheinungsformen an. Die neue Sklaverei unterscheidet sich von der altbekannten. So gibt es keine Urkunden über den Menschenbesitz, denn schließlich ist er verboten. Aus demselben Grund fehlen Gesetze, die einen Minimalschutz der „Ware“ vorschreiben. Den größten Unterschied aber zeigt eine Wirtschaftlichkeitsrechnung: Kostete ein Plantagen-Sklave in Alabama im Jahr 1850 nach heutigen Maßstäben „in der Anschaffung“ etwa 30000 Euro, ist ein vergleichbarer Arbeiter heute schon für etwa 100 Euro zu haben.

Wie rentabel ist ein Sklave?

Doch nicht nur die Investitionen für Zwangsarbeit sind drastisch zurückgegangen: Dauerte es zwanzig Jahre, bis ein Sklave auf den Baumwollfeldern der Südstaaten im 19. Jahrhundert seinen Kaufpreis und seine Unterhaltskosten eingebracht hatte, amortisiert sich ein Zwangsarbeiter in Südasien heute schon nach zwei Jahren. Dieser dramatische Preisverfall veränderte auch die moderne „Sklavenhaltung“. Bei so kurzen Zyklen besteht kein Anlass, sich um die Gesundheit der Unfreien zu kümmern oder älter werdende Sklaven zu versorgen. Nach den Regeln der globalen Marktwirtschaft hält ein Sklavenhalter seine Gesamtkosten gering und entledigt sich unrentabel gewordener Produktionsmittel – und das nicht immer durch Entlassung des Opfers in die Freiheit.

Für diese Entwicklung lassen sich verschiedene Gründe anführen. Eine Voraussetzung ist sicher das dramatische Anwachsen der Weltbevölkerung: Seit dem Zweiten Weltkrieg hat sie sich verdreifacht. Damit wuchs auch die Zahl potenzieller Sklaven. Nährboden ist auch die wachsende Armut in der Dritten Welt, die nach einer aktuellen Studie der UN-Organisation für Industrielle Entwicklung weiter voranschreitet. Wo ein wirtschaftlicher Umbau der Entwicklungsländer vom Agrar- in ein Industrieland versucht wurde, gingen familiäre Bindungen und traditionelle soziale Netze verloren. Auch das begünstigt den Menschenhandel, beispielsweise verkaufen Eltern im Bergland Thailands ihre Töchter in die Bordelle im reicheren Flachland heute oft nicht aus existenzieller Not, sondern um sich beispielsweise ein Fernsehgerät leisten zu können. Ein Schlüsselfaktor für das Fortbestehen der Sklaverei ist zudem die faktische Gesetzlosigkeit in vielen Regionen dieser Welt. Überall dort, wo Politiker und Polizei untätig wegsehen, wenn die ihnen Anbefohlenen in die Sklaverei gepresst werden, nutzt ein gesetzliches Verbot wenig. Und nicht selten unterstützen korrupte Beamte diese illegalen Geschäfte sogar aktiv, treiben entlaufende Sklaven wieder zurück und bestrafen sie.

Eine weitere Gemeinsamkeit aller Formen der Sklaverei ist die psychische Manipulation der Opfer. Der Inder Baldev ist nur einer von vielen, der sich mit seinem Los abgefunden hat. Nach

meinen Erkenntnissen ist vielen Opfern durchaus bewusst, dass sie zu Unrecht als Sklaven gehalten werden. Doch Zwang, Gewalt und psychischer Druck haben sie dazu gebracht, dieses Dasein zu akzeptieren. Das ist vielleicht eine Überlebensstrategie, denn nach dieser Unterwerfung wird permanenter körperlicher Zwang entbehrlich. Der Versklavte nimmt eine neue Identität an und betrachtet seine Situation als Teil eines normalen, wenn auch bedauerlichen Schicksals.

Im Nordosten Thailands begegnete ich dem Mädchen Siri. Eines Tages klopfte eine fremde Frau an die Tür ihres Elternhauses und versprach, der damals 14-Jährigen eine Arbeit zu besorgen. Als Vorschuss auf das zukünftige Einkommen der Tochter gab sie den Eltern 50 000 Baht in bar auf die Hand (damals etwa 2000 Euro). Für das Doppelte wurde Siri dann an ein schäbiges Bordell verkauft. Einmal versuchte sie zu fliehen, da erhöhten die Menschenhändler ihre Schuldenlast. Außer der „Tilgung“ musste das Mädchen eine monatliche Miete von 30 000 Baht entrichten. Dabei verdiente es gerade mal 100 Baht pro Kunde.

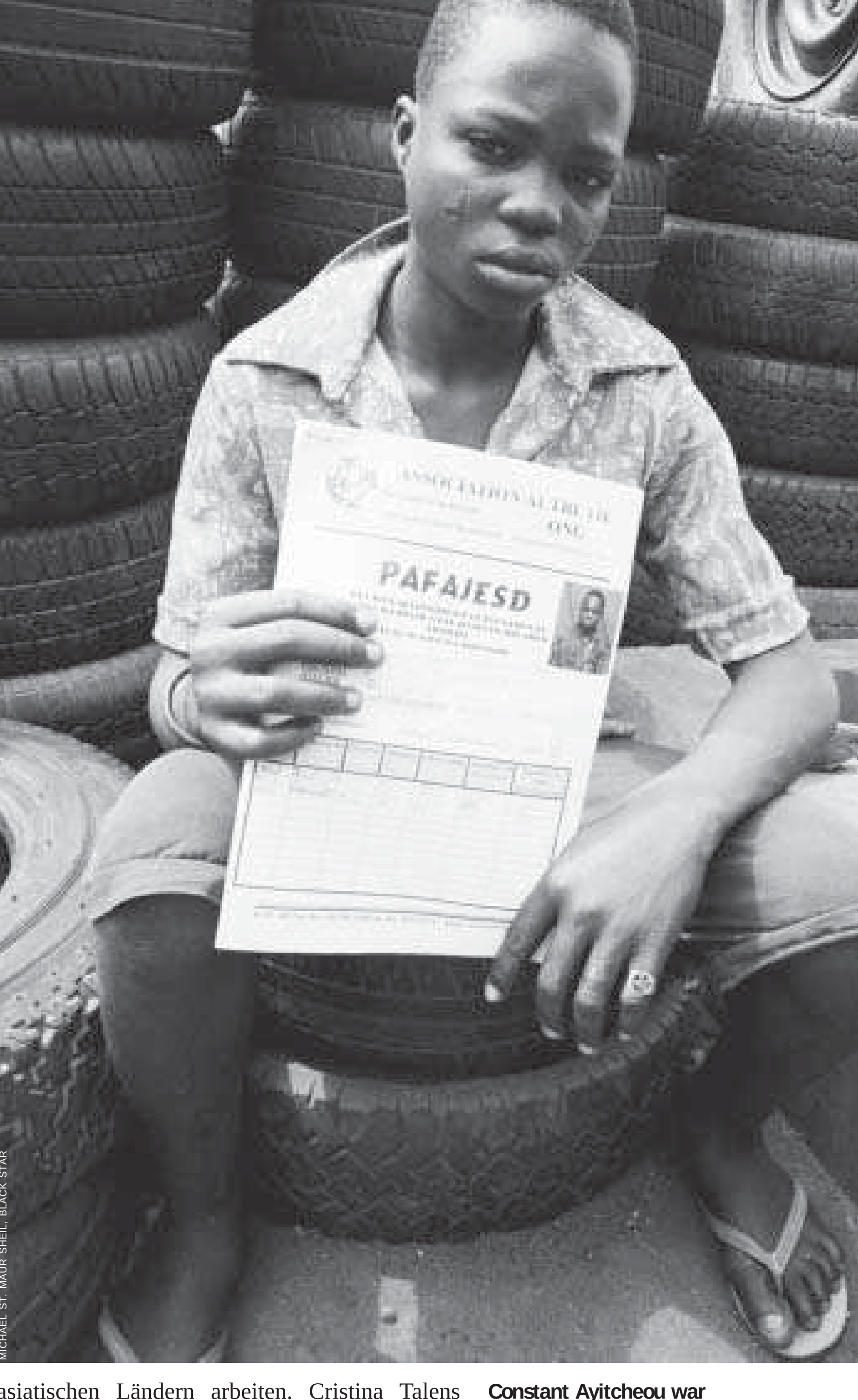
Bei ihrer Ankunft im Bordell hatte Siri keine Vorstellung von der Prostitution. Das erste Mal kam einer Vergewaltigung gleich. In ihrer neuen Welt von Mächtigen und Machtlosen kamen Belohnung wie Bestrafung von derselben Quelle, dem Zuhälter. Eine Beziehung mit dem Zuhälter einzugehen, erweist sich für junge Frauen in Siris Lage häufig als gute Überlebensstrategie. Diese Männer sind Schwerverbrecher, doch sie verstehen sich nicht nur auf rohe Gewalt. Sie sind auch Meister im Schüren von Unsicherheit und Abhängigkeit.

Identität des Leidens

Dabei profitieren sie von den traditionellen thailändischen Geschlechterrollen – Frauen sollen gehorsam und nachgiebig sein. Sogar die Religion wird bemüht, um die Sklavinnen gefügig zu machen. Der Buddhismus thailändischer Prägung sieht in der Geburt als Frau ohnehin eine Strafe für Sünden in vorhergehenden Leben. Die Prostituierten wird nun glauben gemacht, sie sollten durch ihr Los für Verbrechen sühnen.

Um das Leben in der Sklaverei auszuhalten, definieren viele junge Frauen ihre Knechtschaft tatsächlich um in eine Pflicht oder gar eine Form der Buße. Ohne eine andere Wahl zu haben, akzeptieren sie ihre Rolle und die des Zuhälters. Manche dürfen dann sogar an Feiertagen ihre Familien besuchen. Für die Luden ist das eine hochwillkommene Public Relation: Die Mädchen auf dem Lande haben keinerlei Vorstellung von Prostitution und sehen nur die „westlichen“ Kleider ihrer Verwandten – ihre Bereitschaft, freiwillig eine solche Arbeit anzunehmen, wächst. Siri selbst hatte zur Zeit meines Besuchs eine solche Schutzidentität angenommen: „Ich bin eine Hure.“

Eine ähnliche Psychologie wirkt auch bei Haussklaven, die in Europa und Nordamerika für Diplomaten oder Manager aus afrikanischen und asiatischen Ländern arbeiten. Cristina Talens vom Komitee gegen Moderne Sklaverei engagierte sich mehrere Jahre lang für die Befreiung und Rehabilitierung solcher Sklavinnen, die im Gepäck ihrer Herrschaft nach Paris mitgereist waren. Den Körper zu befreien sei einfacher als den Geist zu befreien, so ihre Erfahrung: „Trotz täglicher Prügel, trotz schlechter Lebens- und Arbeitsbedingungen entwickeln Versklavte eine eigenartige mentale Integrität. Manche schätzen sogar Aspekte ihres Lebens, beispielsweise die Sicherheit oder die Klarheit ihrer Weltordnung. Wird die Ordnung gestört, gerät plötzlich alles durcheinander. Einige befreite Frauen wollten sich sogar umbringen. Wir hatten ihnen die tragende Säule ihrer Identität genommen. Plötzlich ▶



MICHAEL ST. MAUR SHEIL, BLACK STAR

Constant Ayitcheou war acht Jahre alt, als ein Freund seines Vaters den Jungen mitnahm. Doch statt einer guten Ausbildung und einem ordentlichen Job erwartete ihn ein hartes Leben als Hausdiener in Nigeria. PAFAJESD ist das französische Akronym der Hilfsorganisation, die an seiner Befreiung beteiligt war.

Die Welt der Sklaverei – Statistik der Unmenschlichkeit

Wer über Sklaverei forscht, muss mit wenig zuverlässigen Zahlen hantieren: Menschenhändler präsentieren keine Geschäftsbilanzen. Hochrechnungen aus den bruchstückhaften Informationen von Polizei, Sozialarbeitern, Journalisten und befreiten Sklaven erlauben lediglich einen groben Überblick. Natürlich sind solche Annahmen immer vorläufig und mit Fehlern behaftet.

So überprüfte die Internationale Organisation für Migration den Ursprung einer der meistzitierten Statistiken zum Thema Menschenschmuggel – diese spricht von 250 000 bis 350 000 im Jahr 1993 nach Westeuropa eingeschleusten Migranten. Wie sich herausstellte, basierte die Zahl auf der Angabe von 60 000 Festnahmen an den Grenzen und einer Schätzung der Grenzpolizei, wonach vier- bis sechsmal so vielen Personen die illegale Einwanderung gelingt. Eine weitere viel zitierte Statistik, derzufolge jährlich 45 000 bis 50 000 Frauen und Kinder in die USA eingeschleust werden, stammte aus einem als Verschlusssache eingestuften Briefing der CIA vom April 1999. Die Herkunft dieser Zahlen bleibt aber im Dunkeln.

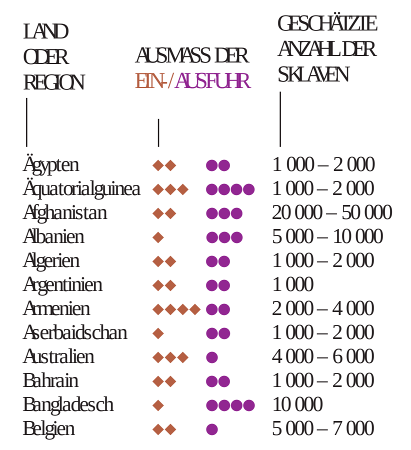
Die unten stehende Tabelle von Kevin Bales, die für fast jedes Land der Welt eine ungefähre Zahl der Sklaven angibt, basiert auf unterschiedlichen Quellen. Bei der Auswertung hat der Forscher berücksichtigt, dass beispielsweise Regierungen das Problem eher unterschätzen, andere Quellen wie Menschenrechtsgruppen dagegen meist zu hohe Zahlen annehmen. Für die Bundesrepublik Deutschland kommt er zu einer Schätzung von 5000 bis 9000 Personen. Dem liegt im Wesentlichen eine Angabe des Bundeskriminalamtes zu Grunde: Im „Lagebild Menschenhandel 2000" berichtet die Behörde von 926 aktenkundlich gewordenen Opfern, fast ausschließlich Frauen, die in die Bundesrepublik verschleppt und hier zur Prostitution gezwungen wurden. Andere Erkenntnisse – etwa über Haussklaven – liegen der Behörde nach eigenen Angaben nicht vor. Ein Faktor fünf bis neun für die Dunkelziffer ist laut Kevin Bales eine moderate Annahme.

Länder und Regionen, für die keine Daten vorliegen, wurden ausgelassen, ebenso der besseren Übersicht halber Länder mit weniger als tausend Sklaven. Die Farbskala gibt das relative Ausmaß der Sklaverei, die Punktewertung die des Handels mit Menschen an.

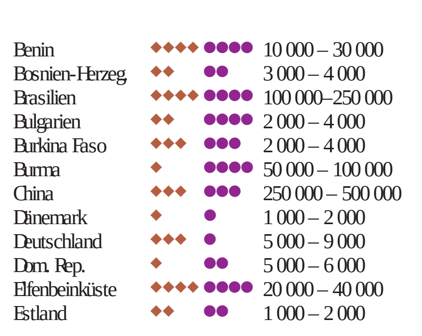
Von George Musser

AUSMASS DER SKLAVEREI

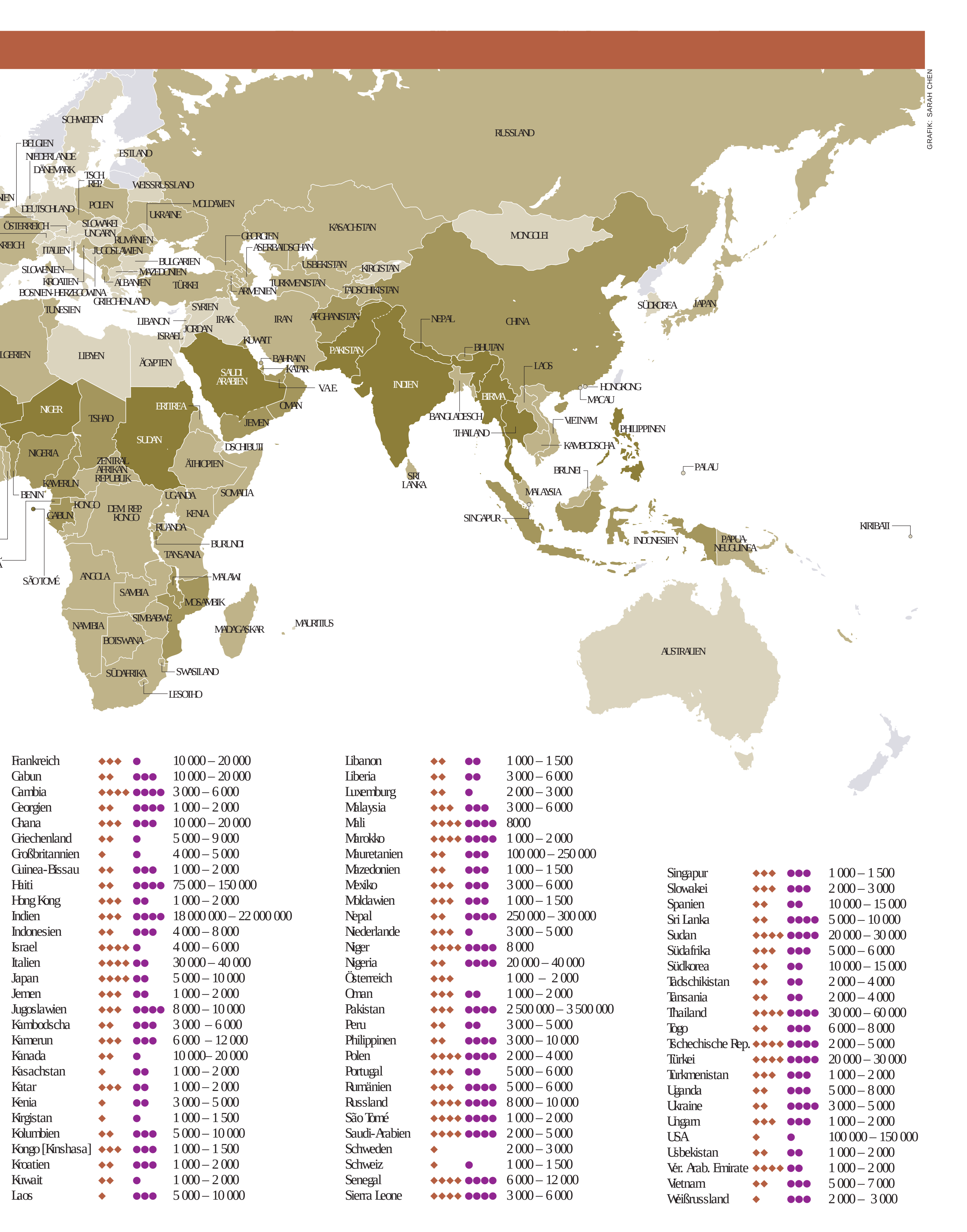
HOCH ← NIEDRIG UNBESTIMMT



LAND ODER REGION	AUSMASS DER EIN-/AUSFUHR		GESCHÄTZTE ANZAHL DER SKLAVEN
Ägypten	◆◆	●●	1 000 – 2 000
Äquatorialguinea	◆◆◆	●●●●	1 000 – 2 000
Afghanistan	◆◆	●●●	20 000 – 50 000
Albanien	◆	●●●	5 000 – 10 000
Algerien	◆◆	●●	1 000 – 2 000
Argentinien	◆◆	●●	1 000
Armenien	◆◆◆◆	●●	2 000 – 4 000
Aserbaidschan	◆	●●	1 000 – 2 000
Australien	◆◆◆	●	4 000 – 6 000
Bahrain	◆◆	●●	1 000 – 2 000
Bangladesch	◆	●●●●	10 000
Belgien	◆◆	●	5 000 – 7 000



Benin	◆◆◆◆	●●●●	10 000 – 30 000
Bosnien-Herzeg.	◆◆	●●	3 000 – 4 000
Brasilien	◆◆◆◆	●●●●	100 000–250 000
Bulgarien	◆◆	●●●●	2 000 – 4 000
Burkina Faso	◆◆◆	●●●	2 000 – 4 000
Burma	◆	●●●●	50 000 – 100 000
China	◆◆◆	●●●	250 000 – 500 000
Dänemark	◆	●	1 000 – 2 000
Deutschland	◆◆◆	●	5 000 – 9 000
Dom. Rep.	◆	●●	5 000 – 6 000
Elfenbeinküste	◆◆◆◆	●●●●	20 000 – 40 000
Estland	◆◆	●●	1 000 – 2 000



Frankreich	◆◆◆	●	10 000 – 20 000
Gabun	◆◆	●●●	10 000 – 20 000
Gambia	◆◆◆◆	●●●●	3 000 – 6 000
Georgien	◆◆	●●●●	1 000 – 2 000
Ghana	◆◆◆	●●●	10 000 – 20 000
Griechenland	◆◆	●	5 000 – 9 000
Großbritannien	◆	●	4 000 – 5 000
Guinea-Bissau	◆◆	●●●	1 000 – 2 000
Haiti	◆◆	●●●●	75 000 – 150 000
Hong Kong	◆◆◆	●●	1 000 – 2 000
Indien	◆◆◆	●●●●	18 000 000 – 22 000 000
Indonesien	◆◆	●●●	4 000 – 8 000
Israel	◆◆◆◆	●	4 000 – 6 000
Italien	◆◆◆◆	●●	30 000 – 40 000
Japan	◆◆◆◆	●●	5 000 – 10 000
Jemen	◆◆◆	●●	1 000 – 2 000
Jugoslawien	◆◆◆	●●●●	8 000 – 10 000
Kambodscha	◆◆	●●●	3 000 – 6 000
Kamerun	◆◆◆	●●●	6 000 – 12 000
Kanada	◆◆	●	10 000– 20 000
Kasachstan	◆	●●	1 000 – 2 000
Katar	◆◆◆	●●	1 000 – 2 000
Kenia	◆	●●	3 000 – 5 000
Kirgistan	◆	●	1 000 – 1 500
Kolumbien	◆◆	●●●	5 000 – 10 000
Kongo [Kinshasa]	◆◆◆	●●●	1 000 – 1 500
Kroatien	◆◆	●●●	1 000 – 2 000
Kuwait	◆◆	●	1 000 – 2 000
Laos	◆	●●●	5 000 – 10 000
Libanon	◆◆	●●	1 000 – 1 500
Liberia	◆◆	●●	3 000 – 6 000
Luxemburg	◆◆	●	2 000 – 3 000
Malaysia	◆◆◆	●●●	3 000 – 6 000
Mali	◆◆◆◆	●●●●	8000
Marokko	◆◆◆◆	●●●●	1 000 – 2 000
Mauretanien	◆◆	●●●	100 000 – 250 000
Mazedonien	◆◆	●●●	1 000 – 1 500
Mexiko	◆◆◆	●●●	3 000 – 6 000
Moldawien	◆◆◆	●●●	1 000 – 1 500
Nepal	◆◆	●●●●	250 000 – 300 000
Niederlande	◆◆◆	●	3 000 – 5 000
Niger	◆◆◆◆	●●●●	8 000
Nigeria	◆◆	●●●●	20 000 – 40 000
Österreich	◆◆◆		1 000 – 2 000
Oman	◆◆◆	●●	1 000 – 2 000
Pakistan	◆◆◆	●●●●	2 500 000 – 3 500 000
Peru	◆◆	●●	3 000 – 5 000
Philippinen	◆◆	●●●●	3 000 – 10 000
Polen	◆◆◆◆	●●●●	2 000 – 4 000
Portugal	◆◆◆	●●	5 000 – 6 000
Rumänien	◆◆◆	●●●●	5 000 – 6 000
Russland	◆◆◆◆	●●●●	8 000 – 10 000
São Tomé	◆◆◆◆	●●●●	1 000 – 2 000
Saudi-Arabien	◆◆◆◆	●●●●	2 000 – 5 000
Schweden	◆		2 000 – 3 000
Schweiz	◆	●	1 000 – 1 500
Senegal	◆◆◆◆	●●●●	6 000 – 12 000
Sierra Leone	◆◆◆◆	●●●●	3 000 – 6 000
Singapur	◆◆◆	●●●	1 000 – 1 500
Slowakei	◆◆◆	●●●	2 000 – 3 000
Spanien	◆◆	●●	10 000 – 15 000
Sri Lanka	◆◆	●●●●	5 000 – 10 000
Sudan	◆◆◆◆	●●●●	20 000 – 30 000
Südafrika	◆◆◆	●●●	5 000 – 6 000
Südkorea	◆◆	●●	10 000 – 15 000
Tadschikistan	◆◆	●●	2 000 – 4 000
Tansania	◆◆	●●	2 000 – 4 000
Thailand	◆◆◆◆	●●●●	30 000 – 60 000
Togo	◆◆	●●●	6 000 – 8 000
Tschechische Rep.	◆◆◆◆	●●●●	2 000 – 5 000
Türkei	◆◆◆◆	●●●●	20 000 – 30 000
Turkmenistan	◆◆◆	●●●	1 000 – 2 000
Uganda	◆◆	●●●	5 000 – 8 000
Ukraine	◆◆	●●●●	3 000 – 5 000
Ungarn	◆◆◆	●●●	1 000 – 2 000
USA	◆	●	100 000 – 150 000
Usbekistan	◆◆	●●	1 000 – 2 000
Ver. Arab. Emirate	◆◆◆◆	●●	1 000 – 2 000
Vietnam	◆◆	●●●	5 000 – 7 000
Weißrussland	◆	●●●	2 000 – 3 000

Interview



Der Soziologe Urs Peter Ruf forschte in Mauretanien.

„Im strengen Sinne haben Sklaven nicht einmal Verwandte“

Exzessive Ausbeutung im heutigen Mauretanien

Wie verändert sich eine Gesellschaft, wenn die traditionelle Sklavenhaltung verboten wird? Im Rahmen seiner Promotion an der Universität Bielefeld ging der Soziologe Urs Peter Ruf dieser Frage in Mauretanien (Westafrika) nach. Dort war erst 1980 die Sklaverei aufgehoben worden.

Spektrum der Wissenschaft: Manche Sklaven kommen nach ihrer Befreiung nur schwer mit dem neuen Leben zurecht, einige ziehen sogar die Abhängigkeit vor. Haben Sie Ähnliches in Mauretanien beobachtet?

Dr. Urs Peter Ruf: Durchaus, aber das ist nur eine Spielart individueller Strategien. Andere kämpfen an ihrem Heimatort um Anerkennung als freie Bürger, wieder andere weichen in die Städte aus.

Spektrum: Welchen Vorteil bringt die Stadt?

Ruf: Anonymität. Sklaven bildeten in Mauretanien eine eigene Bevölkerungsschicht. Ursprünglich stammen die Herren von den Mauren und die Sklaven von Schwarzafrikanern ab. Weil dieses System aber schon viele Jahrhunderte lang existiert, haben sich die Ethnien zwar längst gemischt, doch wer als Sklave geboren wurde, dessen Platz in der Gesellschaft war definiert. Noch heute gelten ehemalige Sklaven und deren Nachkommen als Menschen zweiter Klasse. Besonders in kleinen dörflichen und nomadischen Gemeinschaften auf dem Land, wo jeder jeden kennt, ist es schwer, diesem sozialen Stigma zu entkommen.

Spektrum: Was hat sich für die ehemaligen Sklaven überhaupt verbessert?

Ruf: Unter anderem gibt es jetzt eine andere Rechtsgrundlage bei Streitigkeiten zwischen ehemaligen Herren und Sklaven. Ein wichtiges Thema ist dabei der Landbesitz. Machte ein Sklave ein Stück Land urbar, hätte es ihm nach unserem Rechtsverständnis eigentlich gehören müssen. Doch nur Herren besaßen Land, und da ihnen auch die Sklaven gehörten, konnten sie auch deren Anbauflächen beanspruchen. Wenn der Nachkomme eines Sklaven ein solches Stück Land heute als Eigentum fordert, hat er vor Gericht wenigstens



Ein ehemaliger Sklave bearbeitet ein Stück Land – der Besitz urbaren Bodens ist in Mauretanien ein häufiges Streitthema zwischen einstigen Herren und Nachkommen von Sklaven.

URS PETER RUF

eine Chance. Sicher ist ihm der Erfolg allerdings noch immer nicht.

Spektrum: Dass Sklaven ein Stück Land für den Eigenbedarf bearbeiten durften, bedeutet wohl, dass es schon früher Freiräume gab?

Ruf: Es gab sogar eigenständige religiöse Praktiken innerhalb des islamischen Glaubens. Aber der Besitz von Boden hatte mehr als nur symbolische Bedeutung. Bei der großen Dürre in der Sahel-Zone zu Beginn der 1970er Jahre verloren vor allem kleinere maurische Haushalte mit nur wenigen Sklaven ihren Viehbestand. Wir reden da von siebzig bis achtzig Prozent der Landbevölkerung. Diese Herren vermochten ihre Leibeigenen nicht mehr so zu versorgen wie bis dahin üblich. Gleichzeitig gewann der Ackerbau, den vor allem die Sklaven betrieben, an Bedeutung. Das gab ihnen Auftrieb. Einige widersetzten sich sogar, als man ihnen dieses Land absprach. Letztlich waren es gesellschaftliche Entwicklungen wie diese, denen eine reformwillige Regierung 1980 mit der Aufhebung der Sklaverei endlich Rechnung trug.

Spektrum: Ihr Kollege Kevin Bales glaubt aber an einige hunderttausend Sklaven auch im heutigen Mauretanien. Wie passt das zur aktuellen Rechtslage?

Ruf: Es ist ein bisschen Definitionssache. Im strengen Sinne haben Sklaven nicht einmal Verwandte – sie sind Besitz, und Söhne, Töchter und so weiter sind einfach wieder Besitz des Sklavenhalters. Bales und internationale Organisationen fassen den Begriff etwas weiter im Sinne vollständiger Ausbeutung des Menschen. Während es heute nur vereinzelt Sklaven im „klassischen“ Sinne gibt, wächst aber diese exzessive Ausbeutung. Und in diesem erweiterten Sinne bedeuten seine Zahlen eher eine untere Grenze.

Spektrum: Wer profitiert von dieser neuen Sklaverei?

Ruf: Es sind heute vor allem die wenigen Reichen in diesem so armen Staat, die sich Menschenbesitz leisten können und damit Gewinne erwirtschaften. Da gibt es beispielsweise Bewässerungsprojekte, gefördert mit Entwicklungsgeldern – auch europäischen. Diese Projekte sollten eigentlich jedem kleinen Bauern eine Parzelle in einem fruchtbaren Gebiet sichern. Realität ist jedoch, dass eine kleine gesellschaftliche Elite es verstanden hat, diese Landrechte weitgehend zu kontrollieren, und über Schuldknechtschaft und andere Methoden auch die Menschen dazu de facto in ihren Besitz zu bringen. Von einer egalitären Gesellschaft ist Mauretanien noch weit entfernt.

Das Interview führte **Klaus-Dieter Linsmeier**, Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

hieß es: Dein Leben ist verpfuscht. Fang noch mal von vorne an. Als hätten sie umsonst gelebt.“

Freiheit des Leibes allein ist also noch keine wirkliche Freiheit. Als im Jahr 1865 die Sklaverei in den USA abgeschafft wurde, sah die US-Regierung keinerlei Rehabilitation vor. Vier Millionen Menschen wurden in eine am Boden liegende Wirtschaft entlassen, ohne Ressourcen und nicht einmal mit den nötigsten Schutzrechten ausgestattet. Man kann durchaus behaupten, Amerika leide noch heute unter den Folgen einer Sklavenbefreiung ohne entsprechende Rehabilitationsmaßnahmen.

Der Menschenrechtler Vivek Pandit von der indischen Organisation Vidhayak Sansad wird nicht müde zu betonen: Die eigentliche Befreiung geschähe im Kopf, Befreiung des Körpers allein führt in die Sackgasse – wie wir bei Baldev gesehen haben. Umgekehrt kann die Freiheit des Denkens am Anfang eines Weges stehen, der in die Befreiung des Körpers mündet – wie es bei Meera der Fall war.

Pandits Organisation hat ein Bildungsprogramm entworfen, das ehemalige Sklaven auf ein Leben in Freiheit vorbereiten soll. Es umfasst die Vermittlung von Grundwissen, um Neugier und Interesse an Details zu wecken; Rollenspiele zur Erarbeitung von Problemlösungsstrategien sowie Spiele zur Förderung von strategischem Denken und Teamarbeit. Diesem Training geht ein öffentliches Streitgespräch voraus, in dem der Arbeiter ausführlich von seiner Sklaverei berichtet und sie vor der versammelten Öffentlichkeit für nichtig erklärt. Die Freiheitserklärung wird aufgezeichnet und laut im Dorf verlesen.

Bürger zweiter Klasse

Zurzeit werden solche Modelle in Feldversuchen auf ihre Praxistauglichkeit getestet. Die Erfahrung aus diesen Programmen zeigt, das eine Kombination von wirtschaftlicher Unterstützung, Beratung und Bildung in eine stabile Unabhängigkeit führen kann. Doch diese Arbeit steckt noch in den Kinderschuhen. Noch liegt keine systematische Evaluation dieser Programme vor. Und kein Sozialwissenschaftler hat bislang die Beziehung zwischen Sklaven und Herren in der Tiefe ausgelotet.

Die Psychologie des Sklaven findet ihr Gegenüber in der des Sklavenhalters. Beide verbindet oft eine wechselseitige Abhängigkeit. Fast alle Sklavenhalter, die ich in Pakistan, Indien, Brasilien und Mauretanien getroffen und interviewt habe, waren Familienväter, die sich selbst als Geschäftsleute betrachteten. Diese Säulen der örtlichen Gesellschaft waren alle finanziell gut gestellt, sozial integriert und verfügten zudem über die besten Verbindungen zu Justiz und Politik. Sklaven zu halten gilt in jenen Regionen nicht als asozial. Wenn Ausländer dies anprangerten, verstünden sie Land und Leute nicht.

Wie können so angesehene Menschen derart schlimme Dinge tun? Ein Regierungsbeamter aus Baldevs Distrikt, der selbst Sklaven hält, sprach darüber freimütig: „Natürlich habe ich Sklaven. ▶



CRAIG CHIVERS, AP PHOTO

Grão Mogol, ein Ort in Brasilien: Maria Rodrigues Ferreira Rocha, die Mutter von Marta und dem kleinen Jefferson, leistet Schwerstarbeit an einem Holzkohlenmeiler. Im Alter von fünf Jahren wurde sie Sklavin.

Ich bin ein *Landlord*, ich sorge für sie und ihre Familien, und sie arbeiten für mich. Wenn sie nicht draußen auf den Feldern arbeiten, dann machen sie bei mir Hausarbeit wie Wäsche waschen, Kochen, Putzen, Reparaturen, was halt so anfällt. Es ist doch ganz normal, dass Leute aus der Kol-Kaste für Vaishyas wie mich arbeiten (Kol ist der Stammesname eines dort unterdrückten Volkes, Vaishyas bezeichnet die Kaste der Landbesitzer und Händler. Die Redaktion). Ich gebe ihnen zu essen und ein kleines Stück Land, das sie bestellen können. Außerdem haben sie bei mir Geld geliehen; ich muss also zusehen, dass sie auf meinem Land bleiben, bis die Schuld bezahlt ist. Sehen Sie, ich bin wie ein Vater zu diesen Arbeitern. Es ist eine Vater-Sohn-Beziehung; ich beschütze sie und führe sie. Natürlich muss ich sie manchmal auch disziplinieren, wie es ein Vater auch tun würde.“

Andere Sklavenhalter erzählten mir ähnliche Geschichten: Ihre Sklaven seien für sie wie Kinder, sie bräuchten Kontrolle und Fürsorge. Auch das Argument der Tradition wird angeführt: Die Sklaverei gebe es schon seit Menschengedenken, daher müsse sie der natürlichen Ordnung der Dinge entsprechen. Wieder andere sehen einfach eine Frage der Prioritäten: Sklaven halten zu müssen sei gewiss „eine unglückliche Sache“, räumen sie ein, doch das Wohlergehen ihrer eigenen Familie hänge davon ab. Viele Sklavenhalter befreien sich von eventuellen moralischen Skrupeln, indem sie mehrere Managementebenen zwischen sich und den Sklaven einziehen. Ohne direkten Kontakt und Detailwissen um die Vorgänge entledigen sie sich der Verantwortung nach dem Prinzip „Was ich nicht weiß ...“

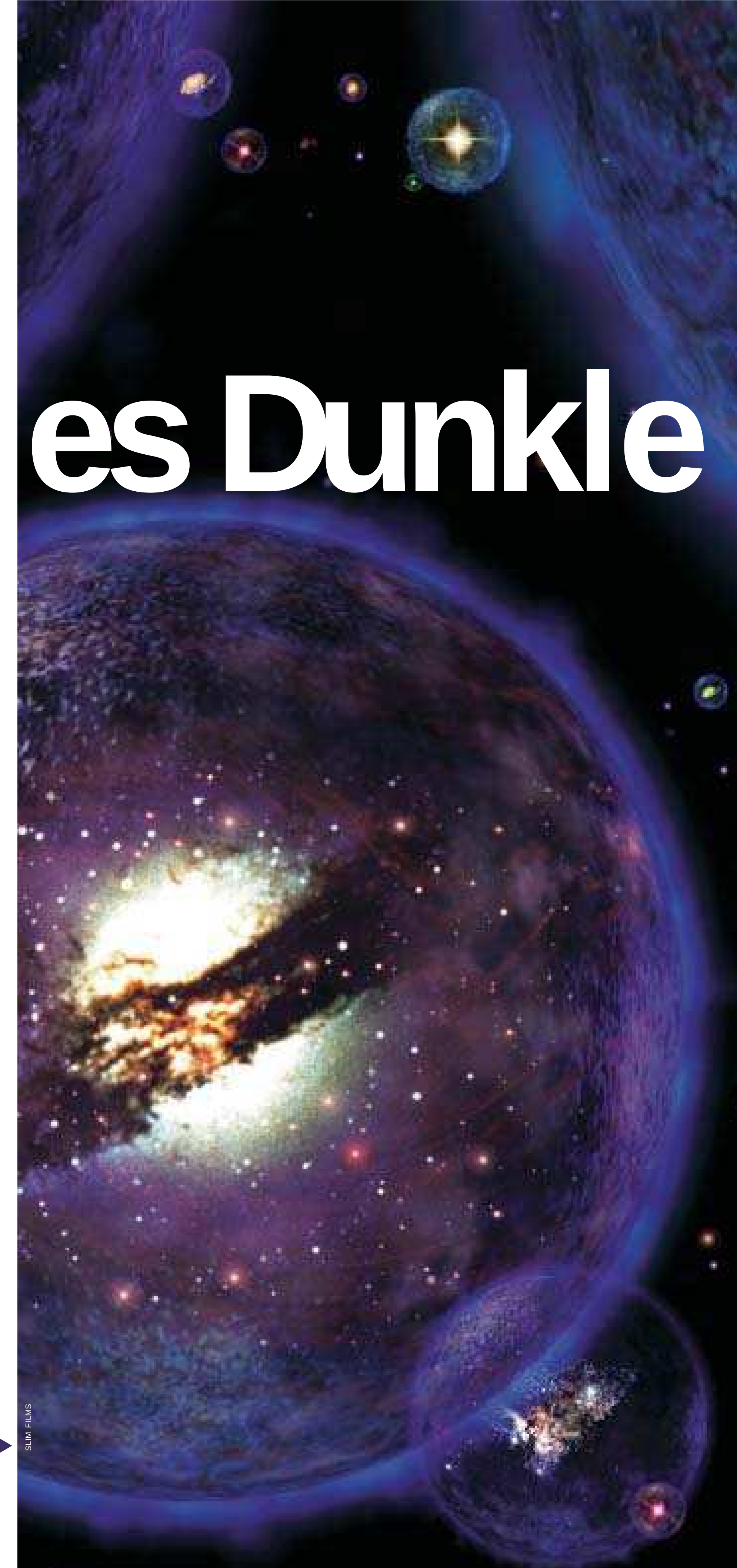
Um die Sklaverei wirkungsvoll zu bekämpfen, müssen deshalb auch Konzepte entwickelt werden, die dem Sklavenhalter Alternativen bieten. Nur dann wird auch den kriminellen Banden, die Menschen täuschen oder verschleppen, der Markt entzogen. Die globalen wirtschaftlichen Verflechtungen erleichtern solche Ansätze nicht gerade. Es gibt zu viele offene Fragen: Welche Verbindungen bestehen zwischen Menschen-, Waffen- und Drogenhandel? Welchen Einfluss hat die Globalisierung der Weltwirtschaft auf die Ströme von Menschen, die über Kontinente hinweg verschoben werden? Wer an diesen Geschäften beteiligt ist, hat wenig Interesse daran, Daten preiszugeben. Schließlich könnte manch ein DVD-Player in den Regalen bleiben, würde bekannt, dass sein geringer Preis in irgendeiner Form der Sklavenhaltung zu verdanken ist.

Wenn es eine gute Nachricht gibt, dann die: Eine immer größere Öffentlichkeit kennt das Problem und verlangt Abhilfe. Hilfsfonds unterstützen den Kampf gegen das Elend der Kindersklaven, Anti-Sklaverei-Organisationen und Vertreter der Industrie versuchen zu kooperieren. Die Sklaverei grassiert und wie jeder Epidemie muss man ihr vehement entgegentreten. ■



Kevin Bales *lehrt Soziologie an der Londoner University of Surrey Roehampton. Er ist Mitglied im Komitee von Anti-Slavery International, der ältesten Menschenrechtsorganisation der Welt mit Sitz in London. Bales berät die Vereinten Nationen bei der Bekämpfung des Menschenschmuggels. 2000 wurde sein Buch* Disposable People *(siehe die Literaturangaben auf Seite 26) mit dem italienischen Literaturpreis ausgezeichnet.*

Gibt es Dunkle



Das All besteht größtenteils aus einer unsichtbaren Substanz von unbekannter Art – meinen die meisten Astrophysiker. Doch vielleicht gibt es eine bessere Antwort.

Von Mordehai Milgrom

Von allen offenen Fragen der modernen Astronomie ist sicher keine so geheimnisvoll wie das Wesen der Dunklen Materie. Die meisten Astronomen glauben, das Universum sei von großen Mengen unbekannten Materials erfüllt. Wie die Zuschauer eines Puppentheaters, die aus dem Zappeln der Marionetten auf einen verborgenen Puppenspieler schließen, folgern Wissenschaftler aus unerklärlichen Bewegungen der sichtbaren Himmelsobjekte, dass eine unsichtbare Form von Materie die Fäden ziehen muss. Doch dieses dunkle Medium entzieht sich bislang jedem Versuch der Astronomen und Physiker, sein Geheimnis zu lüften. Inzwischen haben einige von uns den Verdacht, dass diese Substanz gar nicht existiert, und manche beginnen diese Vermutung ernst zu nehmen.

Das Problem der Dunklen Materie ergibt sich aus einer Diskrepanz zwischen beobachteten und berechneten Massen in Galaxien und großräumigen kosmischen Strukturen. Die Bestandteile solcher Systeme – Sterne und Gas in Galaxien, Gas und Galaxien in Galaxienhaufen – werden in ihrer Bewegung durch die Gravitationsanziehung der übrigen Objekte im Zaum gehalten. Die physikalischen Gesetze teilen uns mit, ▶



Materie?

wie groß die insgesamt vorhandene Masse sein muss, damit das System sich nicht auflöst. Das Problem ist nur, dass die Astronomen viel weniger Masse beobachten, als dafür notwendig wäre.

Diese Massendiskrepanz ist allgegenwärtig. Sie tritt in fast allen Systemen auf – von Zwerggalaxien über normale Galaxien und Galaxiengruppen bis zu riesigen Superhaufen. Sie beträgt in manchen Systemen nur wenig mehr als die sichtbare Masse, in anderen Fällen jedoch das Hundertfache und mehr.

Die Diskrepanz macht sich nicht nur in wohlgeformten Spiralgalaxien bemerkbar, sondern auch in der Entwicklungsgeschichte des gesamten Universums. Lange bevor sich Galaxien bildeten, war das All von einem Plasma aus Atomkernen und subatomaren Teilchen erfüllt. Strahlung durchdrang das Plasma und sorgte dafür, dass es extrem homogen blieb.

Im Schutz der Dunkelheit

Erst als das Plasma zu einem neutralen Gas wurde, das weniger stark mit Strahlung wechselwirkte, bekamen Dichteschwankungen eine Chance, anzuwachsen und Galaxien zu bilden. Wir wissen, wann dieser Übergang stattfand und wie groß die Dichtefluktuationen damals waren. Das Problem ist nur, dass dann einfach nicht genug Zeit blieb, damit aus diesen Fluktuationen heutige Galaxien wurden. Dunkle Materie wäre die Lösung, da sie per Definition neutral ist und somit nicht durch Strahlung homogenisiert wird. Deshalb hätte sie sich von Anfang an kontrahieren können und hätte genügend Zeit gehabt, Objekte von der Größe ganzer Galaxien zu bilden.

Offensichtlich besteht ein Teil der zusätzlichen Masse aus ganz normaler Materie, die nur zu wenig Strahlung abgibt, um mit heutiger Technik entdeckt zu werden: Planeten, Zwergsterne, warmes Gas. All dies sollte präziser leuchtschwache Materie heißen. Sie könnte bis zum Zehnfachen der beobachteten Materie ausmachen – aber auch das wäre doch nur ein Bruchteil der fehlenden Masse. Wenn Wissenschaftler von Dunkler Materie reden, meinen sie in der Regel eine exotische Form von Materie, die für den fehlenden Rest verantwortlich ist. Um die Verwirrung noch zu steigern, vermuten Forscher zusätzlich die Existenz einer so genannten dunklen Energie, die für die kürzlich entdeckte beschleunigte Expansion des Universums verantwortlich sein soll – denn dieses Phänomen ist weder mit normaler noch mit Dunkler Materie zu erklären (siehe „Die Quintessenz des Universums“ von Jeremiah P. Ostriker und Paul J. Steinhardt, Spektrum der Wissenschaft 03/2001, S. 32).

Alles in allem glauben die meisten Astronomen, dass das heutige Universum zu annähernd vier Prozent aus normaler – oder „baryonischer“ – Materie besteht, von der ungefähr ein Zehntel als Gas und Sterne sichtbar ist; zu einem Drittel aus Dunkler Materie einer unbekannten Art; und zu zwei Dritteln aus dunkler Energie, über deren Wesen wir praktisch noch gar nichts wissen.

Wenn wir an den akzeptierten physikalischen Gesetzen festhalten, bleibt den Astronomen als einzige Erklärung für die verschiedenen Massendiskrepanzen nur die Dunkle Materie. Doch falls wir eine Abweichung von den Standardgesetzen hinnehmen, können wir auf die hypothetische Substanz verzichten.

Der Eindruck, die Bewegungen innerhalb der galaktischen Systeme seien durch unsichtbare Massen geprägt, folgt aus der Anwendung einer einzigen Formel der Newton'schen Physik. Diese Formel verbindet zwei grundlegende Gesetze: einerseits Newtons Gravitationsgesetz, das die Schwerkraft zwischen zwei Körpern mit ihren Massen und ihrem Abstand in Beziehung setzt, und andererseits das zweite Newton'sche Gesetz, das Kraft mit Beschleunigung verbindet. Die Beschleunigung, die ein Körper auf seiner Umlaufbahn um ein Gravitationszentrum erfährt, hängt von der Bahngeschwindigkeit und dem Bahnradius ab. Daraus folgt die Formel für den Zusammenhang zwischen Masse, Geschwindigkeit und Bahnradius.

Die Alternative: „Mond“

Diese Gesetze beschreiben die Bahn eines Geschosses und die Bewegungen der Planeten sehr genau. Aber ihre Extrapolation auf Galaxien wurde nie direkt getestet. Was, wenn die Newton'sche Mechanik für solche Größenordnungen versagt? Dann könnte sie vielleicht so modifiziert werden, dass die Dunkle Materie sich erübrigt.

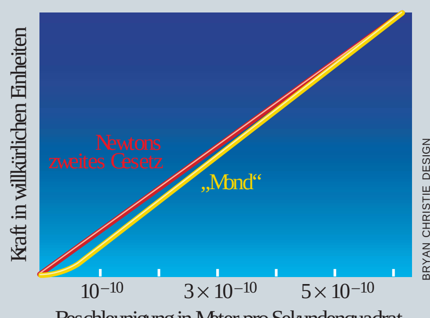
Eine solche Modifikation wäre nicht ohne Beispiel. Immerhin haben sich schon zwei drastische Änderungen der Newton'schen Physik als notwendig erwiesen. Die erste führte zur Relativitätstheorie – sowohl zur Speziellen, die das zweite Newton'sche Gesetz abänderte, als auch zur Allgemeinen, die das Gravitationsgesetz völlig neu formulierte. Eine zweite Modifikation führte zur Quantentheorie, die das Verhalten mikroskopischer – in Spezialfällen auch makroskopischer – Systeme beschreibt. Diese bewährten Erweiterungen der Newton'schen Dynamik wirken sich in der Regel nur unter extremen Bedingungen merklich aus – zum Beispiel die Spezielle Relativitätstheorie bei sehr hohen Geschwindigkeiten, die Allgemeine bei extrem starker Gravitation. Für die

IN KÜRZE

➤ Wenn Astronomen wissen wollen, wie viel Materie das Universum enthält, haben sie zwei Möglichkeiten: Entweder sie zählen alle sichtbaren Objekte zusammen – oder sie messen deren Geschwindigkeiten und folgern aus den physikalischen Gesetzen, wie viel Masse vorhanden sein muss, damit die Schwerkraft die Objekte auf ihren Bahnen hält. Leider liefern die beiden Methoden unterschiedliche Ergebnisse. Die meisten Astronomen schließen daraus, dass sich im All viel unsichtbare Masse verbirgt – die berüchtigte Dunkle Materie.

➤ Doch vielleicht liegt das Problem nicht in der Materie, sondern in den physikalischen Bewegungsgesetzen. Der Autor hat eine Modifikation der Newton'schen Dynamik („Mond“) vorgeschlagen, um die beobachtete Diskrepanz zu erklären.

➤ „Mond“ reproduziert viele Beobachtungen erstaunlich gut, oft sogar besser, als es die Dunkle Materie vermag. Allerdings hat „Mond“ gewisse Schwächen, die sich vielleicht als unwichtig erweisen werden – oder als fatal.



Die Theorie namens „Mond“ modifiziert bei kleinen Beschleunigungen Newtons zweites Gesetz.

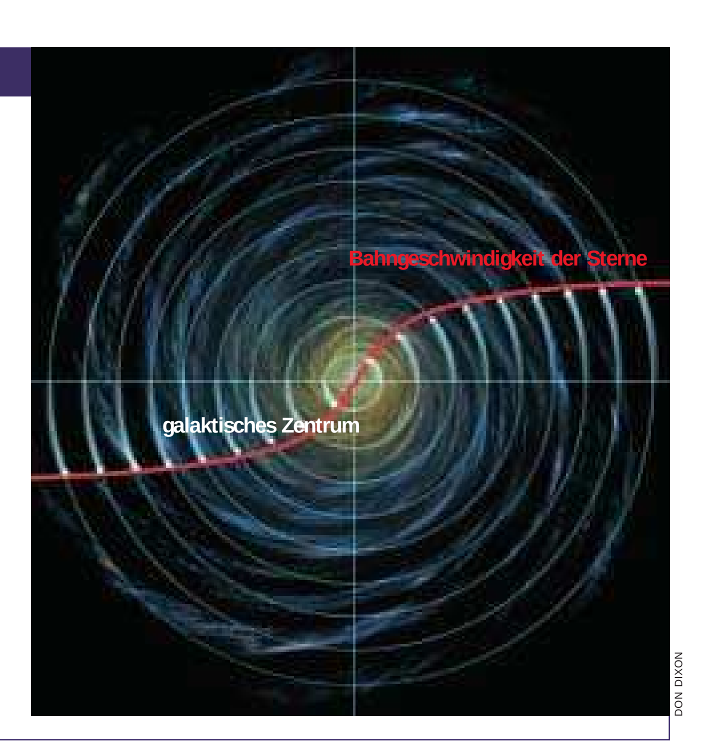
Die galaktische Rotationskurve

Immer im Kreis herum

Wie die Planeten um die Sonne kreisen, so wandern auch die Sterne einer Galaxie um das galaktische Zentrum. Zum Beispiel braucht unsere Sonne rund 200 Millionen Jahre für einen Umlauf um das Zentrum der Milchstraße. Die Sterne in Spiralgalaxien beschreiben fast kreisförmige Bahnen, und die Bahngeschwindigkeit hängt vom Abstand zum Zentrum ab.

Zwei Effekte bestimmen den Geschwindigkeitsverlauf: die Massenverteilung in der Galaxie und die Abnahme der Schwerkraft mit der Entfernung. Der erste Effekt hat rein geometrische Gründe: Die Masse innerhalb einer Umlaufbahn nimmt mit dem Bahnradius zu. Dieser Effekt dominiert in den inneren Regionen der Galaxie. Weiter draußen wird der andere Effekt wichtiger. Insgesamt folgt daraus, dass die Rotationskurve – Bahngeschwindigkeit gegen Entfernung – zunächst ansteigt, dann abflacht und schließlich sinkt.

Nach den Newton'schen Gesetzen sollte die Rotationskurve immer weiter sinken. Doch wenn „Mond" zutrifft, strebt sie einem konstanten Wert zu.



meisten Vorgänge in Galaxien gilt keine dieser Bedingungen.

Welche Eigenschaften galaktischer Systeme sind so extrem, dass sie eine weitere Modifikation erfordern könnten? Das Erste, was einem in den Sinn kommt, ist ihre gigantische Größe: Vielleicht weicht die Schwerkraft über so enorme Entfernungen vom Newton'schen Gravitationsgesetz ab. Schon 1923 schlug der englische Astronom James H. Jeans für galaktische Größenordnungen eine Änderung der Abhängigkeit des Gravitationsgesetzes vom Abstand vor. Allerdings hatten seine Überlegungen noch nichts mit dem Problem der Dunklen Materie zu tun und fußten auf Beobachtungen, die sich später als falsch erwiesen.

Eine andere modifizierte Entfernungsabhängigkeit der Gravitation schlug Arrigo Finzi, damals an der Universität von Rom, im Jahre 1963 vor, um das Problem der Dunklen Materie in Galaxienhaufen aus der Welt zu schaffen. Doch Anfang der 1980er Jahre zeigte ich, dass solche Modifikationen der Abstandsabhängigkeit nicht zu den Beobachtungen passen.

Was aber könnte dann funktionieren? Nachdem ich verschiedene Alternativen systematisch durchprobiert hatte, konzentrierte ich mich auf die Beschleunigung. Sie ist in galaktischen Systemen um viele Größenordnungen kleiner als in unserem normalen Erfahrungsbereich. Die Beschleunigung, die das Sonnensystem in Richtung auf das galaktische Zentrum erfährt, ist mit ungefähr 10^{-10} Meter pro Sekundenquadrat nur rund ein Hundertmilliardstel der 10 Meter pro Sekundenquadrat, die auf ein Space Shuttle in Richtung des Erdmittelpunkts einwirken. Vor fast zwanzig Jahren schlug ich eine Modifikation des zweiten Newton'schen Gesetzes vor, die für kleine Beschleunigungen den Zusammenhang zwischen Beschleunigung und Kraft abändert. Dies war der Anfang der Modifizierten Newton'schen Dynamik, kurz „Mond" genannt.

Mehr Tempo statt mehr Masse

Durch „Mond" wird eine neue Naturkonstante namens a_0 eingeführt; sie hat die Dimension einer Beschleunigung. Ist die jeweilige Beschleunigung wesentlich größer als a_0, dann gilt Newtons zweites Gesetz wie gehabt: Die Kraft ist proportional zur Beschleunigung. Wird die Beschleunigung jedoch klein gegen a_0, verändert sich das zweite Newton'sche Gesetz: Die Kraft wird proportional zum Quadrat der Beschleunigung. Dadurch ist die für eine bestimmte Beschleunigung benötigte Kraft stets kleiner als gemäß der Newton'schen Dynamik. Im Falle der beobachteten Beschleunigungen in Galaxien sagt „Mond" eine kleinere Kraft – und somit eine geringere gravitationserzeugende Masse – voraus als die Newton'sche Dynamik (Diagramm Seite 36). Auf diese Weise erübrigt sich die Dunkle Materie.

In den äußeren Bereichen von Galaxien sinkt die durch Gravitation erzeugte Beschleunigung schließlich unter a_0. Wo das eintritt, hängt vom Wert von a_0 ab – und von der Galaxienmasse: Je größer die Masse, desto weiter draußen setzen die Effekte von „Mond" ein. Für den durch die Daten geforderten Wert von a_0 und eine Galaxie typischer Masse liegt der Übergang mehrere zehntausend Lichtjahre vom Zentrum der Galaxie entfernt. Für einen typischen Galaxienhaufen beträgt die Übergangsentfernung einige Millionen Lichtjahre.

Angenommen, die Hauptmasse einer Galaxie liegt innerhalb eines bestimmten Radius; dann sollte der Newton'schen Dynamik zufolge die Geschwindigkeit von Objekten – Gas oder Sterne –, die außerhalb dieses Radius umlaufen, mit zunehmendem Bahnradius abnehmen. Das entspricht den Verhältnissen im Sonnensystem: Der Großteil der Gesamtmasse steckt in der Sonne, und der sonnennächste Planet Merkur läuft viel schneller um sie herum als beispielsweise die Erde. Doch sobald „Mond" ins Spiel kommt, ändert sich die Situation radikal. Bei genügend großer Entfernung vom galaktischen Zentrum nehmen die Bahngeschwindigkeiten mit wachsendem Bahnradius nicht mehr ab, sondern erreichen einen konstanten Wert. Diese konstante Geschwindigkeit ist proportional zur vierten Wurzel der Galaxienmasse.

Wie gut stimmt „Mond" mit den Daten überein? In Spiralgalaxien nehmen die Bahngeschwindigkeiten mit der Entfernung vom Zentrum nicht immer mehr ab, sondern nähern sich einem konstanten Wert – wie von „Mond" vorhergesagt. Außerdem ist dieser Wert gemäß einer aus ▶

Beobachtungen gewonnenen Regel, der so genannten Tully-Fischer-Beziehung, proportional zur vierten Wurzel der galaktischen Leuchtkraft. Dies folgt zwanglos aus „Mond“, sofern die Leuchtkraft einigermaßen proportional zur Masse ist. Neuere Beobachtungen rechtfertigen diese Annahme: Ein direkter Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Masse ist sogar enger als der zwischen Geschwindigkeit und Leuchtkraft.

Diese Gesetzmäßigkeiten zeichneten sich bereits vage ab, als ich „Mond“ vorschlug; sie waren sogar Auslöser der neuen Theorie. Was die modifizierte Newton'sche Dynamik besonders attraktiv macht, ist, dass sie viele Effekte vorhersagt, die zu der Zeit, als ich sie formulierte, noch gar nicht überprüft werden konnten. Ein Beispiel dafür sind die Galaxien geringer Oberflächenhelligkeit (*Low-surface-brightness*-Galaxien); diese Gebilde leuchten so schwach, dass sie kaum nachweisbar sind. Während die Beschleunigung bei normalen Galaxien nur in den Außenbezirken unter a_0 sinkt, ist sie in leuchtschwachen Galaxien überall kleiner als a_0. Mit anderen Worten, gemäß „Mond“ sollte sich die Massendiskrepanz in einer solchen Galaxie überall auswirken. Zu der Zeit, als ich „Mond“ vorschlug, kannten die Astronomen nur wenige leuchtschwache Galaxien und hatten keine davon im Detail untersucht. Seither haben sie entdeckt, dass die Massendiskrepanz in diesen Galaxien tatsächlich unverhältnismäßig viel größer ist als gewöhnlich (siehe „Die leuchtschwächsten Galaxien“ von Gregory D. Bothun, Spektrum der Wissenschaft 04/1997, S. 62). „Mond“ sagte nicht nur diesen Effekt richtig voraus, sondern auch seine Größenordnung.

Galaxienhaufen-Kerne – die Ausnahme von der Regel?

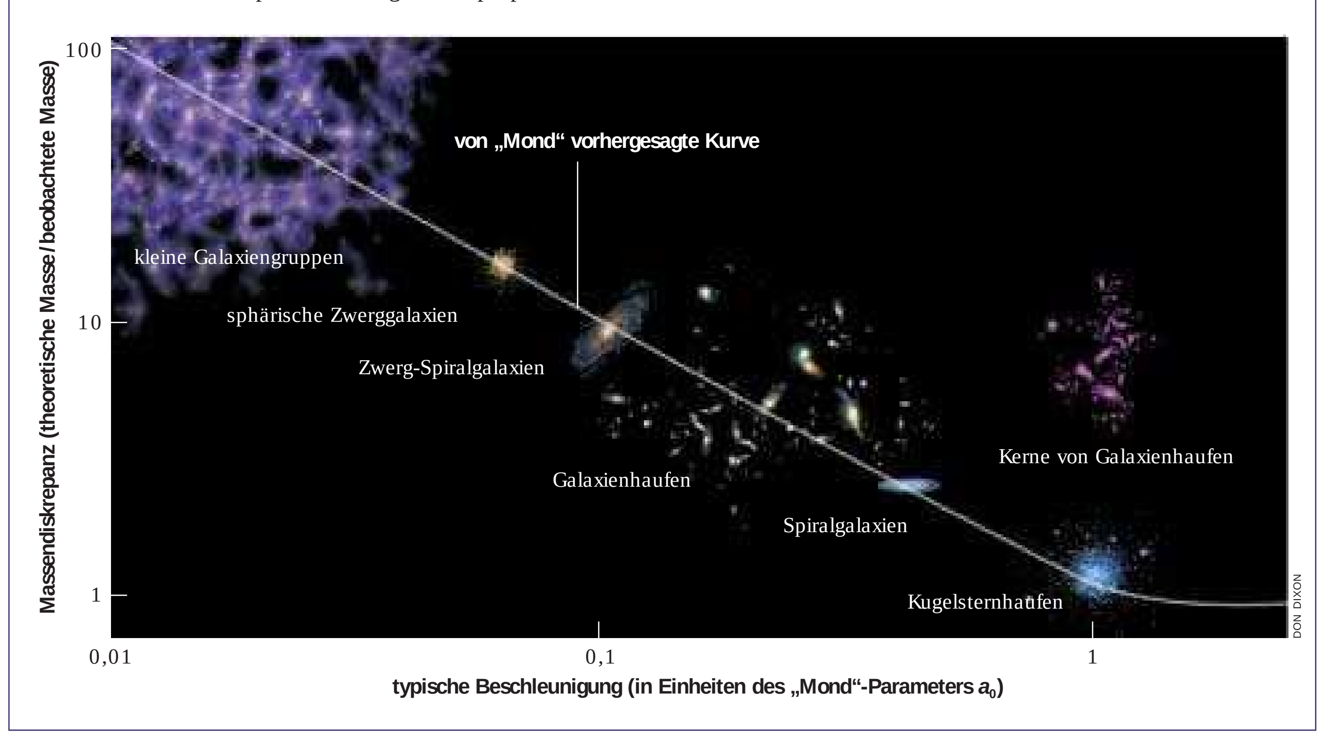
Ein weiterer Erfolg ist die korrekte Wiedergabe der galaktischen Rotationskurven, das heißt der Abhängigkeit der Bahngeschwindigkeit von der Entfernung. Erst seit Ende der 1980er Jahre verfügen die Astronomen über genügend detaillierte Beobachtungen, um sie mit theoretischen Voraussagen zu vergleichen – und die Übereinstimmung mit „Mond“ ist beachtlich (siehe Kasten Seite 40). Bei diesem Vergleich muss ein Parameter für jede Galaxie angepasst werden: der Umrechnungsfaktor von Leuchtkraft in Masse. Der entsprechend angepasste Wert stimmt mit den theoretischen Erwartungen gut überein. Hingegen erfordert das Modell der Dunklen Materie für jede Galaxie noch mindestens zwei zusätzliche Parameter, die angepasst werden müssen – je einen für die Ausdehnung und die Gesamtmasse der unsichtbaren Materie. Trotz dieser Flexibilität erklären die gängigen Modelle mit Dunkler Materie die Rotationsdaten nicht so gut wie „Mond“.

Trägt man für verschiedene galaktische Systeme die Massendiskrepanz gegen die typische Beschleunigung auf, so stimmt das Muster fast vollständig mit den Vorhersagen von „Mond“ überein (siehe Bild im Kasten unten). Die einzige Ausnahme taucht in sehr großen Galaxienhaufen auf. Wenn wir diese Haufen im Ganzen betrachten, zeigen sie eine Massendiskrepanz um einen Faktor zwischen fünf und zehn, die durch „Mond“ erklärt werden kann. Sobald wir uns jedoch auf den inneren Bereich konzent- ▶

„Mond“ in galaktischen Systemen

Ein Erfolg mit Schönheitsfehlern

Alle Arten von galaktischen Systemen – von Kugelsternhaufen über Zwerggalaxien bis zu Galaxiengruppen und großen Galaxienhaufen – zeigen eine Diskrepanz zwischen der beobachteten und der aus inneren Bewegungen abgeleiteten Masse. Diese Diskrepanz ist umgekehrt proportional zur charakteristischen Beschleunigung – wie von der Modifizierten Newton'schen Dynamik („Mond“) vorhergesagt. Modelle mit Dunkler Materie können diesen Zusammenhang nicht erklären. Dafür versagt „Mond“ in den Kerngebieten großer Galaxienhaufen.



KOMMENTAR

Keine schlechte Idee

„Mond“ ist umstritten, aber keineswegs abwegig

Von Anthony Aguirre

Obwohl die große Mehrheit der Astronomen glaubt, dass es Dunkle Materie gibt, hat eine alternative Hypothese – die Modifizierte Newton'sche Dynamik („Mond“) – in aller Stille durchgehalten, seit sie 1983 vorgeschlagen wurde. Wie Mordehai Milgrom in seinem Artikel berichtet, kann „Mond“ eine beeindruckende Anzahl richtiger Vorhersagen zur galaktischen Dynamik vorweisen. Die Reaktionen der meisten Astronomen fallen in drei Kategorien:

1. „Mond“ ist tautologisch. Die Theorie erklärt nur, worauf sie eigens zugeschnitten ist. Sie hat ein paar Zufallstreffer gelandet, aber deren Erfolg wird von den Befürwortern hochgespielt.
2. „Mond“ beschreibt eine überraschende, geradezu rätselhafte Regelmäßigkeit in der Entstehung und Entwicklung von Galaxien. Die Standardtheorie der Gravitation gilt noch immer, und die Dunkle Materie existiert – aber sie verhält sich irgendwie „Mond“-gemäß. Bei detaillierter Anwendung auf ungewöhnliche Galaxien oder nichtgalaktische Systeme wird „Mond“ versagen.
3. Unter bestimmten Voraussetzungen tritt „Mond“ an die Stelle der Newton'schen Dynamik. Diese Modifikation ist ein Teilaspekt einer künftigen Theorie, die Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie ersetzen wird.

Den ersten Standpunkt vertraten bis vor kurzem die meisten Astronomen. Doch seit ein paar Jahren ist diese völlige Ablehnung schwer haltbar. Zahlreiche Folgerungen aus der Milgrom'schen Hypothese haben sich bestätigt – oft durch Arbeiten von durchaus kritisch oder neutral eingestellten Forschern. Zudem gibt „Mond“ die Statistik der galaktischen Eigenschaften mindestens so gut wieder wie die Modelle mit Dunkler Materie, obwohl Letztere bei entscheidenden Aspekten der Galaxienentstehung zu Ad-hoc-Annahmen greifen.

Am eindrucksvollsten ist, dass „Mond“ die Details der Galaxienrotation vorherzusagen vermag, und zwar bloß ausgehend von der Verteilung der sichtbaren Materie und einem angenommenen festen Verhältnis von Masse zu Leuchtkraft. Das übersteigt die Möglichkeiten der Modelle mit Dunkler Materie bei weitem. Sowohl diese Vorhersagen als auch die entsprechenden Beobachtungen gehen weit über das hinaus, was zu der Zeit, als „Mond“ formuliert wurde, absehbar war. „Mond“ ist nicht tautologisch.

Unterdessen ist die Standardtheorie der Dunklen Materie bei der Anwendung auf Galaxien in Schwierigkeiten geraten. Zum Beispiel sagt sie viel zu dichte Kerne Dunkler Materie in den Galaxien voraus. Diese Probleme könnten zwar von den Mängeln heutiger Computersimulationen herrühren, aber viele Theoretiker nehmen die Unstimmigkeiten ernst und ziehen Modifizierungen der Eigenschaften Dunkler Materie in Betracht.

Die Erfolge von „Mond“ und die Schwierigkeiten mit Dunkler Materie haben mehrere Astronomen vom ersten zum zweiten Standpunkt bekehrt – doch nur einige wenige zum Standpunkt Nummer drei. Warum nur so wenige? Ich meine, dafür gibt es drei Gründe.

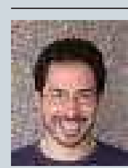
Erstens verändert „Mond“ nur die Newton'sche Dynamik. Trotz einiger Anstrengung ist es den Befürwortern noch nicht gelungen, ihre Theorie so zu formulieren, dass sie auf relativistische Phänomene wie Gravitationslinsen und die kosmische Expansion angewandt werden kann. Offenbar ist dieses Ziel schwer zu erreichen – oder gar nicht. Wie auch immer, „Mond“ ist bisher außer Stande, zu wichtigen kosmologischen Tests anzutreten und sie entweder zu bestehen oder durchzufallen.

Zweitens ist fraglich, ob die Theorie auch bei anderen Systemen so gut funktioniert wie bei Galaxien. Die Voraussagen über heißes Gas in Galaxienhaufen weichen krass von den Beobachtungen ab – peinlicherweise ganz so, als seien die Haufen durch noch nicht entdeckte Materie dominiert. Die Befürworter von „Mond“ hoffen natürlich, dass es sich dabei um sehr leuchtschwache gewöhnliche Materie handelt, etwa um kleine Sterne oder warmes Gas. Diese Möglichkeit ist zwar nicht ausgeschlossen, aber durch Beobachtung und Theorie stark eingeschränkt. Es ist jedenfalls recht beunruhigend, dass eine wie auch immer geartete Dunkle Materie herhalten muss, um eine Theorie zu stützen, die extra zu deren Abschaffung erdacht wurde.

Der dritte Grund hängt mit den ersten beiden zusammen: Die Standardtheorie der Dunklen Materie hat in den letzten Jahren einige eindrucksvolle Erfolge erzielt. Numerische Simulationen ergeben eine räumliche Verteilung des intergalaktischen Gases, die ausgezeichnet zu den Daten passt. Alle unabhängigen Schätzungen für die Masse der Dunklen Materie in Galaxienhaufen stimmen überein. Die theoretisch hergeleitete Entwicklung kosmischer Strukturen verknüpft die großräumige Galaxienverteilung, die wir heute beobachten, korrekt mit den winzigen Temperaturfluktuationen der kosmischen Hintergrundstrahlung – den Relikten der Dichteschwankungen vor 13 Milliarden Jahren.

Was sollen die Astronomen also tun? Die stärksten Befürworter der Milgrom'schen Hypothese sollten weiter nach einer fundamentalen Theorie für „Mond“ suchen, denn ohne eine solche Begründung wird die Mehrzahl der Physiker nie von der Standardposition abgehen. Wir anderen Forscher sollten „Mond“ als eine bequeme Faustregel nutzen – ob wir nun eine Modifizierung der Newton'schen Dynamik akzeptieren oder nicht. Wir könnten die Regel vielleicht Milgroms Anpassungsformel, kurz Maf, nennen und damit betonen, dass wir sie als praktisches Werkzeug ansehen, aber nicht unbedingt gleich die Standardphysik ändern wollen.

Wenn die Allgemeine Relativitätstheorie zutrifft und die Dunkle Materie wirklich existiert, dann wird Maf mit zunehmender Genauigkeit der Messungen letztlich versagen. In der Zwischenzeit kann Maf als kompakte Zusammenfassung eines großen Wissensschatzes über die Bildung und Entwicklung von Galaxien sehr nützlich sein.



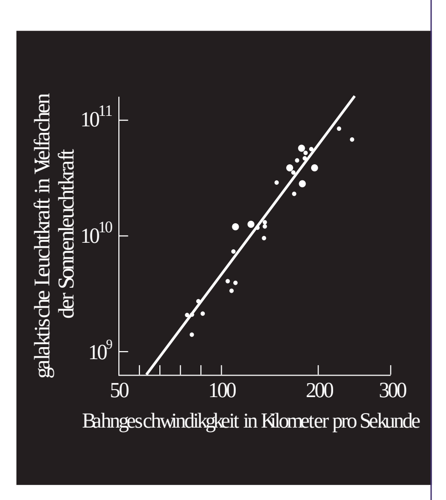
Anthony Aguirre *arbeitet als theoretischer Kosmologe am Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey). Er ist der Hauptautor von zwei kritischen Untersuchungen über „Mond“ (im Internet verfügbar unter* **arXiv.org/abs/astro-ph/0105184** *und* **arXiv.org/abs/hep-ph/0105083***).*

Vergleich der Theorie mit den Daten

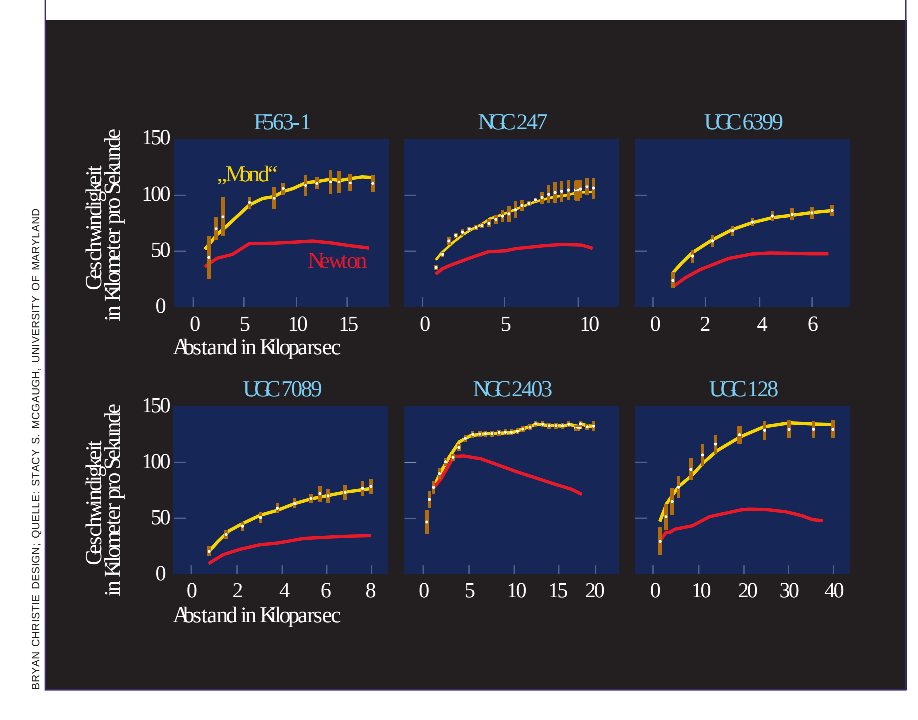
Die größten Erfolge von „Mond“

„Mond“ gibt wichtige galaktische Daten mit hoher Genauigkeit wieder. Gemäß der aus Beobachtungen gewonnenen Tully-Fischer-Relation ist die Bahngeschwindigkeit der Sterne in den Außenbezirken von Spiralgalaxien proportional zur gesamten Leuchtkraft der betreffenden Galaxie (rechts). „Mond“ gibt für diesen Zusammenhang eine natürliche Erklärung.

Unten sind die Rotationskurven einiger Galaxien angegeben. Während „Mond“ gut zu den Beobachtungsdaten passt (gelbe Kurve), muss die Diskrepanz der normalen Newton'schen Dynamik (rot) durch die Annahme Dunkler Materie kompensiert werden.



DON DIXON; QUELLE: ROBERT H. SANDERS, ASTRONOMISCHES KAPTEYN-INSTITUT, UND MARC A. W. VERHEIJEN, UNIVERSITY OF WISCONSIN, MADISON



BRYAN CHRISTIE DESIGN; QUELLE: STACY S. MCGAUGH, UNIVERSITY OF MARYLAND

rieren, bleibt ein Fehlbetrag übrig: „Mond“ vermag nicht die gesamte unsichtbare Masse wegzuerklären. Vielleicht versagt hier die Theorie an sich, aber möglicherweise sind die Beobachtungen noch unvollständig. In diesen Systemen könnten große Mengen leuchtschwacher gewöhnlicher Materie – blasse Sterne oder lauwarmes Gas – verborgen sein.

Gewiss würde man „Mond“ gern auch mit physikalischen Experimenten prüfen und nicht nur mit astronomischen Beobachtungen. Doch leider sind Labortests nicht durchführbar. Das „Mond“-Kriterium gilt für die Gesamtbeschleunigung in einem absoluten Bezugsrahmen. Auf der Erde oder im nahen Sonnensystem würden Hintergrundeffekte – hervorgerufen durch die Erdanziehung, die Erddrehung, die Bewegung um die Sonne und unzählige andere Faktoren – die Wirkung von „Mond“ unkenntlich machen, selbst wenn wir ein Experiment mit genügend kleinen internen Relativbeschleunigungen durchführen könnten. Genauso schwierig wäre es, die Theorie anhand der Planetenbewegungen zu testen. Die Beschleunigung der um die Sonne kreisenden Körper sinkt erst beim zehntausendfachen Abstand Erde-Sonne unter a_0 – weit jenseits der Plutobahn. Allerdings ist die Struktur von „Mond“ für hohe Beschleunigungen – bei denen die Theorie nur minimal von der Newton'schen Dynamik abweicht – noch nicht bekannt. Möglicherweise ist die gewiss winzige Abweichung dort immerhin groß genug, um beobachtbare Effekte zu produzieren. Sollten sich die gelegentlich behaupteten Bewegungsanomalien mancher Raumsonden bewahrheiten, könnte „Mond“ dafür eine Erklärung liefern.

Eine Idee auf der Suche nach einer Theorie

Ähnlich wie die Planck'sche Konstante in der Quantenmechanik spielt auch a_0 in der Modifizierten Dynamik viele unterschiedliche Rollen. Es spricht für die Theorie, dass der gleiche Wert – rund 10^{-10} Meter pro Sekundenquadrat – auf viele Arten bei der Beschreibung galaktischer Systeme auftaucht.

Trotz solcher Erfolge ist „Mond“ vorläufig nur eine begrenzte phänomenologische Theorie. Mit phänomenologisch meine ich, dass sie nicht durch fundamentale Prinzipien motiviert ist oder darauf aufbaut. Sie ist unmittelbar aus der Notwendigkeit entsprungen, gewisse Beobachtungen zu beschreiben und zu erklären; das hat sie übrigens mit den Anfängen der Quantenmechanik und erst recht mit dem Konzept der Dunklen Materie gemeinsam. „Mond“ ist aber außerdem begrenzt, denn sie vermag noch nicht einmal alle Phänomene zu erklären, für die sie konzipiert ist.

Das hängt damit zusammen, dass die Modifizierte Newton'sche Dynamik noch nicht in eine Theorie integriert ist, die den Prinzipien der Speziellen oder Allgemeinen Relativität genügt. Vielleicht ist dies unmöglich, vielleicht aber nur eine Frage der Zeit. Immerhin hat es lange gedauert, bis der von Max Planck, Albert Einstein und Niels Bohr entwickelte Quantenbegriff in der Schrödinger-Gleichung seine schlüssige Formulierung fand – und noch länger, bis er mit der Speziellen Relativitätstheorie vereint werden konnte. Und trotz aller Bemühungen ist es bis heute nicht gelungen, Quantenphysik und Allgemeine Relativitätstheorie unter einen Hut zu bringen.

Beim gegenwärtigen Stand der Theorie versagt „Mond“ dort, wo zum einen die Beschleunigungen kleiner als a_0 sind (sodass „Mond“ eine Rolle spielt) und zum anderen extreme Geschwindigkeiten oder Gravitationsfelder auftreten (sodass auch die Relativitätstheorie ins Spiel kommt). Schwarze Löcher erfüllen zwar das zweite Kriterium, aber nicht das erste: In der Nähe eines Schwarzen Lochs kann die Beschleunigung niemals kleiner als a_0 werden. Doch Licht, das

sich durch das Gravitationsfeld galaktischer Systeme ausbreitet, erfüllt beide Kriterien. Diesen Vorgang, der zum Gravitationslinseneffekt führt, vermag „Mond“ nicht richtig zu beschreiben (siehe „Gravitationslinsen“ von Joachim Wambsganß, Spektrum der Wissenschaft 05/2001, S. 44). Beobachtungen, die sich den Linseneffekt zu Nutze machen, zeigen dieselbe Massendiskrepanz wie Beobachtungen der galaktischen Dynamik. Aber wir wissen noch nicht, ob „Mond“ die Diskrepanz in beiden Fällen erklären kann.

Das zweite System, für das sowohl „Mond“ als auch die Relativitätstheorie gebraucht wird, ist das Universum in seiner Gesamtheit. Daraus folgt, dass die Kosmologie nicht mit „Mond“ behandelt werden kann. Diese Unfähigkeit betrifft vor allem Fragen nach den anfänglichen Strukturen im Universum. „Mond“ lässt sich zwar auf fertig ausgebildete, von der kosmologischen Ursuppe abgelöste Systeme anwenden, aber es kann die Zeit davor nicht beschreiben.

Einige Forscher haben dennoch vorläufige Versuche unternommen, Phänomene der kosmologischen Frühzeit mit einer modifizierten Dynamik zu skizzieren. Zum Beispiel haben Robert H. Sanders vom Astronomischen Kapteyn-Institut in Groningen (Niederlande) und Adi Nusser vom Technion-Israel Institute of Technology gewisse Szenarien der Galaxienbildung entwickelt, indem sie „Mond“ mit zusätzlichen Annahmen ergänzten. Allerdings ist solchen Bemühungen ohne eine zu Grunde liegende Theorie nicht wirklich zu trauen.

Trägheit und Kosmologie

In welcher Richtung sollte man nach dieser grundlegenden Theorie suchen? Ein Hinweis mag der Wert von a_0 sein. 10^{-10} Meter pro Sekundenquadrat beschleunigen einen Körper während einer Zeit, die dem Alter des Universums entspricht, von null bis auf nahezu Lichtgeschwindigkeit. Somit ist a_0 ungefähr so groß wie das Produkt zweier wichtiger Konstanten, der Lichtgeschwindigkeit und der Hubblekonstante, der gegenwärtigen Expansionsrate des Universums. Außerdem ist a_0 ungefähr so groß wie die durch die dunkle Energie verursachte Beschleunigung. Sollte diese numerische Nähe nicht bloß Zufall sein, so könnte sie entweder bedeuten, dass die Kosmologie irgendwie in lokale physikalische Gesetze wie das Trägheitsgesetz eingeht und dadurch „Mond“ erzeugt oder dass Kosmologie und lokale Physik von etwas Gemeinsamem beeinflusst werden, das beiden denselben Stempel aufdrückt.

Die Modifizierte Dynamik legt nahe, dass Trägheit – das Verhalten eines Körpers unter Krafteinwirkung – keine inhärente Eigenschaft von Körpern ist, sondern auf ihrer Wechselwirkung mit dem übrigen Universum beruht. Diese Vermutung entspricht einer alten Idee, dem so genannten Mach’schen Prinzip, dem zufolge die Trägheit durch die Gesamtheit der im Universum vorhandenen Materie verursacht wird.

Die Physik kennt genügend Beispiele, in denen die effektive Trägheit von Teilchen keine ihnen innewohnende Eigenschaft ist, sondern vielmehr durch Wechselwirkung mit einem Hintergrundmedium entsteht. Elektronen in Festkörpern verhalten sich manchmal, als würde ihre effektive Masse durch den Festkörper stark verändert. Könnte ein analoger Effekt die echte Trägheit verursachen? Was könnte die Beschleunigung hemmen und dadurch Trägheit erzeugen?

Eine faszinierende Möglichkeit ist das Vakuum – das, was übrig bleibt, wenn man die gesamte vorhandene Materie und Energie entfernt. Gemäß der Quantentheorie bleibt dabei nicht völlige Leere zurück, sondern ein minimaler Restbestand aller möglichen Energieformen. Die Wechselwirkung des Vakuums mit Teilchen könnte zur Trägheit makroskopischer Objekte beitragen. Interessanterweise ist das Vakuum auch eine mögliche Erklärung für die dunkle Energie in der Kosmologie. Allerdings wissen wir nicht, ob das Vakuum für die gesamte Trägheit verantwortlich gemacht werden kann und ob es wirklich eine Erklärung für „Mond“ liefert.

Obwohl die modifizierte Dynamik galaktische Phänomene gut reproduziert, bleiben viele Forscher überzeugt, dass „Mond“ keine fundamentale Wahrheit ausdrückt: Die Modifizierte Newton’sche Dynamik sei zwar vielleicht eine praktische Zusammenfassung dessen, was wir in der Natur sehen, aber all diese Zusammenhänge würden sich eines Tages zwanglos aus einem verfeinerten Modell der Dunklen Materie ergeben. Vor einem Jahr behaupteten Manoj Kaplinghat und Michael S. Turner, damals beide an der Universität Chicago, der Anschein einer charakteristischen Beschleunigung wie a_0 trete automatisch in solchen Modellen auf. Gemäß ihrem Szenario sagen diese Theorien die Bildung von Halos aus Dunkler Materie eines bestimmten Typs rund um Galaxien voraus.

Ein offenes Rennen

Kurz darauf habe ich gezeigt, dass dieses Szenario nicht funktioniert. Kaplinghat und Turner arbeiten mit groben Näherungen, die den beobachteten Halos und detaillierten numerischen Simulationen des Verhaltens Dunkler Materie widersprechen. Diese Simulationen geben bei ihrem heutigen Stand keinen Aspekt der Phänomenologie von „Mond“ wieder. Obendrein erklärt das von ihnen behauptete Resultat nur einen Bruchteil der Erfolge von „Mond“. Aber es ist durchaus möglich, dass „Mond“ auf andere Weise aus dem Konzept der Dunklen Materie folgt. Das wird die Zukunft zeigen.

In der Zwischenzeit gilt es, die beobachtbaren Folgen von „Mond“ zu verstehen und die Theorie zu verbessern; daran arbeiten unter anderem Sanders, Jacob D. Bekenstein von der Hebräischen Universität in Jerusalem und Stacy S. McGaugh von der Universität von Maryland. „Mond“ bleibt die erfolgreichste Alternative zur Dunklen Materie. Die Beobachtungen scheinen sogar eher für die Modifizierte Dynamik zu sprechen als für die Dunkle Materie. Solange der endgültige Beweis für die Existenz der Dunklen Materie aussteht, sollten wir für Alternativen offen sein. ■



Mordehai Milgrom *ist Professor für Theoretische Physik am Weizman-Institut in Rehovot (Israel). Er ist der Urheber der Modifizierten Newton’schen Dynamik („Mond“), der plausibelsten Alternative zur Dunklen Materie. Seine bevorzugten Forschungsgebiete sind Kosmologie und Hochenergie-Astrophysik.*

Literaturhinweise

How Cold Dark Matter Theory Explains Milgrom’s Law. Von Manoj Kaplinghat und Michael S. Turner in: Astrophysical Journal, Bd. 569, S. L19 (2002).

Modified Newtonian Dynamics as an Alternative to Dark Matter. Von Robert H. Sanders und Stacy S. McGaugh in: Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics, Bd. 40 (2002).

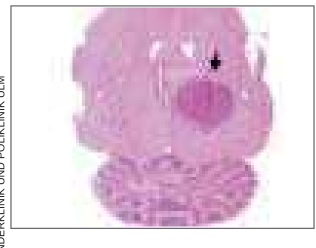
A Modification of the Newtonian Dynamics as a Possible Alternative to the Hidden Mass Hypothesis. Von Mordehai Milgrom in: Astrophysical Journal, Bd. 270, S. 365 (1983).

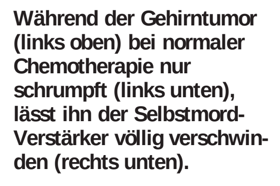
Weblinks zum Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis“.*

MEDIZIN

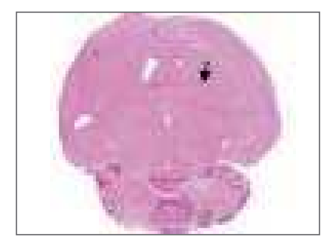
Heilsamer Selbstmord

Sich selbst zum Wohle der Gemeinschaft zu opfern – diese großmütige Tat vollbringen manchmal auch Zellen. Sie verfügen sogar über ein spezielles Programm dafür. Von außen oder innen angeschaltet, bringt es sie dazu, sich in einem Apoptose genannten Prozess selbst zu zerstören. Die meisten Krebstherapien machen sich diesen tödlichen Mechanismus zu Nutze, indem sie ihn gezielt in Tumorzellen auslösen. Allerdings gehorchen nicht alle Adressaten bereitwillig: Manche haben ihr Selbstmordprogramm blockiert. Infolgedessen werden Tumore durch Strahlungs- oder Chemotherapie oft nicht vollständig beseitigt, und die verbliebenen resistenten Zellen wuchern ungehindert weiter. Die Selbstmordblockade aufzuheben ist deshalb schon lange ein großes Ziel der Krebsforscher. Mediziner um Klaus-Michael Debatin von der Universitätskinderklinik Ulm haben es nun erreicht. Als Erfolgsrezept erwies sich eine Kombination aus einem Apoptose-Auslöser mit so genannten Smac-Peptiden: Bruchstücken eines Proteins, das normalerweise als zellinterne Antwort auf Selbstmordsignale produziert wird. Die Ausschnitte sind für sich allein im Stande, die Blockade des Zelltodes aufzuheben, dabei aber klein genug, durch die Außenmembran in die Tumorzellen einzudringen. In Versuchen mit Mäusen ließen sie Gehirntumore vollständig verschwinden. *(Nature medicine, 8/2002, S. 808)*









KLAUS-MICHAEL DEBATIN, UNIVERSITÄTSKINDERKLINIK UND POLIKLINIK ULM

Während der Gehirntumor (links oben) bei normaler Chemotherapie nur schrumpft (links unten), lässt ihn der Selbstmord-Verstärker völlig verschwinden (rechts unten).

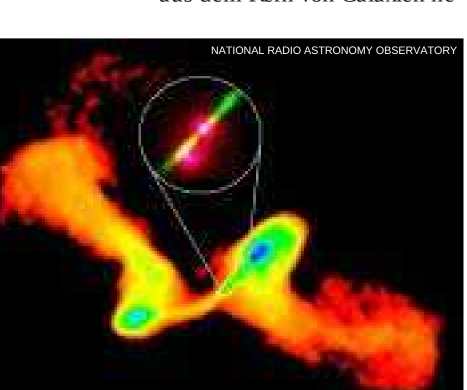


DAVID BICKFORD, UNIVERSITÄT MIAMI

ASTROPHYSIK

Und sie verschmelzen doch!

Was geschieht beim Zusammenstoß zweier Galaxien mit den supermassiven Schwarzen Löchern in ihren Zentren? Verschmelzen sie gleichfalls oder halten sie Abstand und kreisen auf ewig in einem kosmischen Pas de deux umeinander? David Merrit von der Rutgers-Universität in New Brunswick (New Jersey) und Ronald D. Ekers von der Australia Telescope National Facility in Sydney glauben, diese alte Streitfrage jetzt entscheiden zu können. Bilder des Radioteleskops VLA in New Mexico zeigen gigantische Partikelstrahlen, die aus dem Kern von Galaxien herausschießen. Solche Jets entstehen beim Sturz von Materie in den Mahlstrom eines Schwarzen Lochs, und ihre Flugbahnen verlaufen parallel zu dessen Rotationsachse. Wie Merrit und Ekers herausfanden, zeigen manche Jets jedoch einen scharfen Knick, haben also irgendwann ihre Richtung geändert. Auch die Rotationsachse des zugehörigen Wirbels muss sich demnach gedreht haben. Dafür aber gibt es nur eine Erklärung: Das Schwarze Loch ist mit einem anderen zusammengestürzt. Theoretiker müssen nun ihre Modelle anpassen; denn die ergeben noch einen Pas de deux. (*National Radio Astronomy Observatory, 1.8.2002*)


NATIONAL RADIO ASTRONOMY OBSERVATORY

Geknickte „Jets“ (Ausschnitt) zeugen vom Ineinanderstürzen supermassiver Schwarzer Löcher als Folge der Vereinigung ihrer Muttergalaxien.



MEERESBIOLOGIE

Riffe aus Bakterien

Mächtige Riffe aus Methan fressenden Mikroorganismen hat ein Forscherteam um Walter Michaelis von der Universität Hamburg mit dem Tauchboot „Jago“ in den Küstengewässern des Schwarzen Meeres entdeckt. Sie schließen eine wichtige Lücke in der Erklärung des Lebens auf der frühen Erde, als es noch keinen freien Sauerstoff in der Atmosphäre gab. Damals spielte Methan, das bei der Zersetzung von Biomasse in großen Mengen frei wurde, eine wichtige Rolle als Nährstoff und Energieträger. Doch wie ließ es sich ohne Möglichkeit der „Verbrennung“ (Oxidation) mit Sauerstoff verwerten? Die Bauherren der Riffe im sauerstofflosen, aber methanreichen Schwarzen Meer liefern nun die Antwort. Es sind Vergesellschaftungen von Bakterien und urtümlichen Archaea, die gemeinsam das Methan mit Sulfat aus dem Meerwasser zu Kohlendioxid oxidieren. Letzteres bildet teilweise Carbonat, das in Form von Kalk ausfällt und so den bis zu vier Meter hohen turmartigen Riff-Strukturen ihre Stabilität verleiht. Eine ähnliche Symbiose Methan fressender Bakterien und Archaea war schon vor zwei Jahren auf der Oberfläche von Methanhydrat-Lagerstätten in der Tiefsee gefunden worden. (*Science, 9.8.2002, S. 1013*)



GHOSTDABS, UNIVERSITÄT HAMBURG

Den verkalkten Kern der Riffstruktur umgeben rosafarbene Mikrobenmatten.


Die Geschwister hocken noch in Reih und Glied auf Papas Rücken, nur ein wagemutiger Jungfrosch setzt schon auf dem Kopf zum Absprung an.

ÖKOLOGIE

Sammeltaxi für Jungfrösche

Rauf auf Papas Rücken und ab durch die Berge: So abenteuerlich beginnt das Leben bestimmter Breitmaulfrösche auf Papua-Neuguinea. In einem Akt väterlicher Brutfürsorge, wie ihn die Wissenschaft bisher nicht kannte, nehmen die Männchen der Spezies *Liophryne schlaginhaufeni* und *Sphenophryne cornuta* ihre Nachkommen huckepack auf eine erste große Reise. Zuvor haben sie die Eier bewacht, aus denen die Jungfrösche direkt schlüpfen, ohne ein Kaulquappenstadium zu durchlaufen. Drei bis maximal neun Nächte lang reitet der Nachwuchs auf dem väterlichen Rücken und wird dabei insgesamt 34 bis 55 Meter weit getragen. Den Sinn der Aktion sehen David Bickford und Kollegen von der Universität Miami in einer großräumigen Verteilung der Jungfrösche, die während der Wanderung an verschiedenen Stellen nacheinander herunterspringen. Das bringt gleich mehrere Vorteile: Es verringert die Konkurrenz um Nahrung, erschwert Räubern den Beutefang und reduziert die Wahrscheinlichkeit von Inzucht. Bei Landwirbeltieren ist die Brutpflege durch das Männchen sonst extrem selten. (*Nature, 8.8.2002, S. 601*)

TEILCHENPHYSIK

Sprung im Weltbild

Erzwingt das Myon eine Revision des physikalischen Weltbildes? Präzisionsmessungen einer internationalen Wissenschaftlergruppe unter Führung von Lee Roberts von der Universität Boston und Vernon Hughes von der Yale-Universität in New Haven ergaben, dass das „anomale magnetische Moment" dieses Schwesterteilchens des Elektrons von den Voraussagen des Standardmodells der Teilchenphysik abweicht. Für ihr Experiment schickten die Wissenschaftler polarisierte Myonen in einem supraleitenden Magneten auf eine Kreisbahn. Das Magnetfeld stand dabei senkrecht zum Spin der Teilchen und damit zu deren magnetischem Moment. Das gesuchte anomale magnetische Moment ist dann proportional zu dem Winkel, um den der Spin des Myons während eines Umlaufs kippt. Die Forscher konnten die Spinrichtung allerdings nur indirekt ermitteln: über den Drall von Elektronen, die beim Zerfall der kurzlebigen Myonen entstehen und dabei deren Spinrichtung übernehmen. Über die Deutung des Ergebnisses rätselt die Fachwelt noch. Eine Erklärung könnten Theorien liefern, die jedem bekannten Teilchen einen „supersymmetrischen" Partner hinzugesellen. (*Brookhaven National Laboratory, 30.7.2002*)


BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY

Stätte umstürzlerischen Treibens: das Synchrotron des Brookhaven National Laboratory

ARCHÄOLOGIE

Älteste Dame Europas?

Die Schachuhr muss, zumindest in Europa, um 500 Jahre zurückgestellt werden. Bei der Ausgrabung eines auf das fünfte Jahrhundert datierten byzantinischen Palasts im Süden Albaniens förderten britische Forscher um Richard Hodges von der University of East Anglia in Norwich eine vier Zentimeter hohe Schachfigur aus Elfenbein zu Tage. Mit ihrem kleinen Kreuz auf der Spitze könnte sie entweder eine Dame oder einen König darstellen. Erfunden im zweiten oder dritten Jahrhundert im fernen Indien, ist das anspruchsvolle Strategiespiel also keineswegs erst im zehnten oder elften Jahrhundert ins Abendland gekommen, wie Wissenschaftler bislang glaubten. Der Fund in der Mittelmeer-Stadt Butrint, die zum Weltkulturerbe gehört, widerlegt auch die gängige These, dass die europaweite Verbreitung des Schachs ursprünglich den Arabern zu verdanken sei. Das kleine Kreuz, so spekulieren die Forscher, weist auf christliche Spieler hin. Auch reich dürften sie gewesen sein: In der westlichen Welt war Elfenbein im fünften Jahrhundert ein kostspieliger und ausgesprochen seltener Rohstoff. (*University of East Anglia, 5.8.2002*)


UNIVERSITY OF EAST ANGLIA

Diese Schachfigur beweist: Europäer kannten das Strategiespiel schon 500 Jahre früher als bisher vermutet.

MEDIZINTECHNIK

Blutpumpe

Das Kunstherz AbioCor ist seit gut einem Jahr in der klinischen Erprobung. Das eigene Herz des Patienten wird bei diesem Typ weitgehend entfernt.

JAMES WORRELL

aus Plastik und Titan

Vor einem Jahr implantierten Ärzte erstmals todkranken Patienten das Kunstherz AbioCor. Mit diesem technischen Totalersatz lebt eine Strategie wieder auf, die viele Forscher seit zwanzig Jahren praktisch abgeschrieben hatten.

Von Steve Ditlea

Die Maschine aus Plastik und Titan, kaum größer als eine Grapefruit, erinnert ein wenig an die Laugenpumpe einer Waschmaschine. Eingepflanzt in die menschliche Brust soll sie eines der ehrgeizigsten Ziele der Medizin verwirklichen helfen: ein versagendes menschliches Herz dauerhaft durch ein kleines mechanisches Gerät zu ersetzen. Entwickelt von Abiomed, einer Firma im US-amerikanischen Danvers, Massachusetts, ist AbioCor das erste Ersatzherz, bei dem alle wesentlichen Komponenten in den Körper implantiert werden. Frühere Geräte wie etwa das Jarvik-7, das in den 1980er Jahren weltweit für Furore sorgte, fesselten Patienten hingegen auf Dauer an einen sperrigen Druckluftkompressor. Beim neuartigen AbioCor hingegen dringen weder Schläuche noch Kabel durch die Haut, der Patient bleibt mobil.

Im Juli 2001 erhielt der erste Mensch das neue Kunstherz. Im Laufe der nächsten neun Monate kamen sechs weitere schwerstkranke Patienten dazu. Doch hinterlassen die ersten Versuche einen zwiespältigen Eindruck. Bei Redaktionsschluss waren sechs der sieben Patienten verstorben: zwei bereits innerhalb von 24 Stunden nach der Implantation, einer innerhalb eines Monats, zwei weitere nach fünf und ein Patient immerhin erst nach zehn Monaten. Bei dem einzigen noch heute Überlebenden liegt die Operation mittlerweile bereits ein Jahr zurück. Allerdings hatten alle Patienten vor dem Eingriff voraussichtlich nur noch einen Monat zu leben – ein wesentliches Kriterium, den Versuch mit ihrem Einverständnis überhaupt zu wagen. Für die Vertreter von Abiomed hat ihr Kunstherz daher seinen prinzipiellen Wert bereits erwiesen.

Nach über einem Jahr Erprobung an todgeweihten Patienten lässt sich allerdings noch nicht sagen, ob mit dem Kunstherzen AbioCor ein Durchbruch gelingen wird. Sollte die Zulassungsbehörde in den USA, die Food and Drug Administration (FDA), das Gerät als viel versprechend einstufen, dürfte sie einer zweite Versuchsserie zustimmen. Dann ließe sich das System zusätzlich an Patienten mit etwas besserem Gesundheitszustand testen. AbioCor-Vertreter hoffen, dass mit ihrem Kunstherzen Kranke eines Tages sogar länger überleben als mit einem Spenderherzen. Heute leben fünf Jahre nach einer herkömmlichen Transplantation noch rund drei Viertel aller Patienten. Jährlich stehen aber allein in den USA mehr als 4000 wartenden Patienten weniger als 2500 Spenderherzen zur Verfügung. In Deutschland wurden im vergangenen Jahr laut Eurotransplant 407 Spenderherzen verpflanzt, gleichzeitig standen aber am Stichtag 31. Dezember 2001 aktuell 337 Menschen auf der Warteliste.

Theoretisch könnte AbioCor vielen Betroffenen das Leben retten. Doch muss sich das Kunstherz gegen ein weni- ▶

IN KÜRZE

➤ Die Idee, ein versagendes menschliches Herz durch ein dauerhaft implantiertes mechanisches Kunstherz zu ersetzen, wurde nach heftig umstrittenen Versuchen in den 1980er Jahren weitgehend aufgegeben. Doch im Juli 2001 begannen solche klinischen Versuche erneut – mit AbioCor, einem Kunstherzen, bei dem alle wesentlichen Komponenten in den Körper des Patienten implantiert werden.

➤ Erste Ergebnisse hinterlassen einen gemischten Eindruck. Von sieben schwerstkranken Patienten, die AbioCor erhielten, hat bislang einer überlebt – aber das schon ein Jahr. Infektionen traten keine auf, aber drei Patienten erlitten einen Schlaganfall.

➤ Sollten sich die Überlebensraten verbessern, könnte das Gerät einmal eine Alternative für Menschen sein, die vergeblich auf ein Spenderherz warten. Dabei wird AbioCor allerdings mit weniger radikalen Behandlungsmethoden konkurrieren müssen: den Herz-Unterstützungssystemen sowie vielleicht auch einmal mit einer Stammzelltherapie.

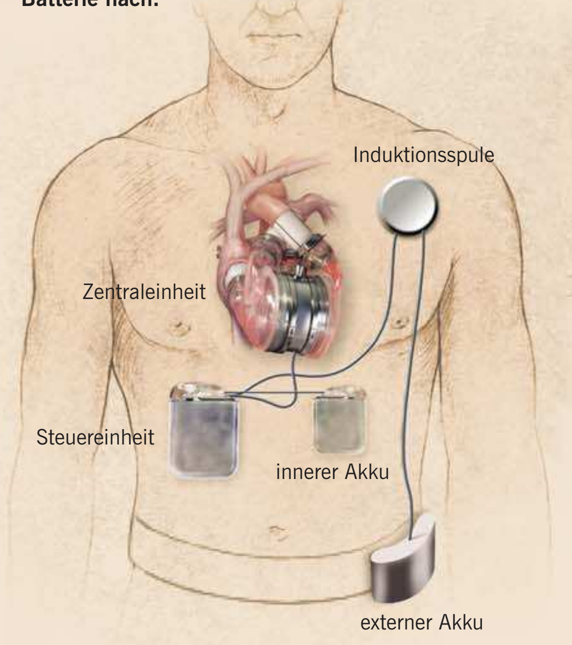
Wie das Kunstherz AbioCor in der Brust schlägt

Wie sein natürliches Vorbild hat auch das Kunstherz AbioCor eine linke und eine rechte Kammer. In der linken Abteilung kommt das sauerstoffreiche Blut von den Lungen an und wird von hier in den Körper gepumpt. Die rechte Kammer befördert hingegen sauerstoffarmes Blut aus dem Körper zur Lunge. Zwischen beiden Kammern sitzt das mechanische Äquivalent der natürlichen Herzwand: ein hermetisch abgeschirmter zentraler Pumpmechanismus, der die Bewegungen des Kunstherzens generiert.

Sein Herzstück besteht aus einem Elektromotor, der eine miniaturisierte Kreiselpumpe mit 5000 bis 9000 Umdrehungen pro Minute antreibt. Diese bewegt ihrerseits eine zähflüssige Hydraulikflüssigkeit. Ein zweiter Motor steuert ein Schieberventil, sodass die Flüssigkeit zwischen den beiden dehnbaren Seiten des Pumpmechanismus pendelt (Bildserie rechts außen). Strömt sie in den linken Bereich, wird die Plastikwand dort nach außen gebeult, was das sauerstoffreiche Blut aus der linken „Herzkammer" des AbioCor in den Körper drückt. Gleichzeitig leert sich der rechte Bereich. Seine Plastikwand zieht sich zurück, und in die rechte „Herzkammer" von AbioCor kann sauerstoffarmes Blut vom Körper einströmen.

Vier Plastikventile ahmen die natürlichen Herzklappen nach. Die Zuleitungen für das vom Körper beziehungsweise von der Lunge kommende Blut werden an dem verbleibenden linken und rechten Vorhof des ursprünglichen Herzens angeschlossen, die Leitungen für die Blutabfuhr hingegen an die Arterien. Das ganze Gerät wiegt etwa ein Kilogramm und benötigt für seinen Betrieb 20 Watt. Innerer Akku, elektrische Induktionsspule und Steuermodul tragen ein weiteres Kilo zum implantierten Teil des Systems bei. Externe Lithium-Akkus an einem Gürtel laden den inneren Akku fortlaufend über eine Induktionsspule nach. Liegt der Patient im Bett, kann eine Konsole die Energiezufuhr und Überwachung übernehmen.

Die Module von AbioCor: **Die Zentraleinheit ist über innere Kabel mit einer Steuereinheit verbunden. Sie passt die Herzfrequenz dem Bedarf an. Eine Energietransferspule lädt über eine Induktionsspule unter der Haut die innere Batterie nach.**



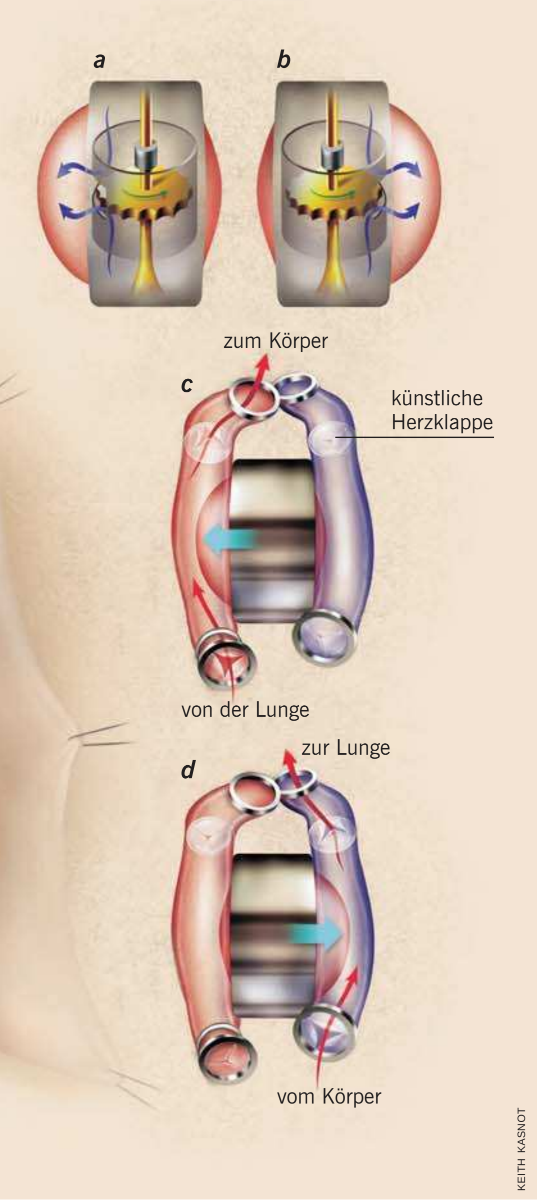
Anschlussprobleme: **Das Kunstherz wird an Reste des rechten und linken Herzvorhofs angeschlossen. Bei den ersten sechs Patienten kamen noch Teile zum Einsatz, deren Plastikstreben die Wände der Vorhöfe auseinander halten sollten. Diese Streben werden nicht mehr verwendet, weil sich darauf bei zwei Verstorbenen Blutgerinnsel gebildet hatten.**

rechter Vorhof
linker Vorhof
Plastikstreben
vernähte Anschlussteile

AbioCor im Körper: **Der Herzbeutel, eine bindegewebige Umhüllung des Pumporgans, ist auf dieser künstlerischen Darstellung noch aufgeschnitten und zurückgeklappt.**

Hauptschlagader
Lungenarterie
rechter Vorhof

Der Pumpmechanismus: **Er ahmt die Arbeit des natürlichen Herzens nach, indem er eine Hydraulikflüssigkeit hin- und hertreibt. Auf den Abbildungen unten ist das Gerät jeweils aus der rückseitigen Perspektive gezeichnet. Eine Kreiselpumpe dreht sich permanent in eine Richtung, während ein Steuerventil die Hydraulikflüssigkeit alternierend nach links oder rechts lenkt (*a* und *b*).**
Strömt die Flüssigkeit nach links, drückt sie eine Plastikmembran in die linke Kammer von AbioCor: Sauerstoffreiches Blut wird in den Körper gepumpt (*c*).
Strömt die Flüssigkeit nach rechts, wird die Membran in die rechte Kammer von Abiocor gedrückt: sauerstoffarmes Blut wird in die Lungen gepumpt (*d*).



ger radikales Verfahren behaupten. Eines davon hat bereits Tausenden von Patienten wieder zu einer ausreichenden Herzfunktion verholfen. Ärzte hatten ihnen eine Pumpe an die wichtige linke Herzkammer angeschlossen, die am häufigsten versagt. Diese „Linksherz-Unterstützungssysteme“ sollten ursprünglich nur kurze Wartezeiten bis zum Eintreffen eines Spenderherzens überbrücken. Mittlerweile belegen aber Studien, dass sie Patienten für einige Jahre am Leben halten können (Kasten auf Seite 51).

Anders als lange angenommen, scheint das menschliche Herz sich in gewissem Maße sogar selbst reparieren zu können, indem es neues Muskelgewebe ausbildet. Der Wettlauf um Therapien, die mittels Stammzellen dem Herzen zur Selbstheilung verhelfen sollen, ist bereits in vollem Gange (siehe den Kasten auf Seite 52). Ein todkranker Patient kann freilich nicht warten, bis diese Verfahren Wirklichkeit werden.

Die ersten Ansätze für ein Kunstherz reichen bereits ein halbes Jahrhundert zurück. 1957 ersetzten Willem J. Kolff, der Erfinder der Nieren-Dialysemaschine, und Tetsuzo Akutsu von der Cleveland Klinik das Herz eines Hundes durch ein Gerät aus Polyvinylchlorid, das mit Druckluft betrieben wurde. Das Tier überlebte neunzig Minuten. Einige Jahre später rief US-Präsident Lyndon B. Johnson ein Kunstherz-Programm an den Nationalen Gesundheitsinstitutionen in Bethesda (US-Bundesstaat Maryland) ins Leben. 1969 implantierte Denton A. Cooley vom texanischen Herz-Institut in Houston erstmals einem Menschen ein Kunstherz – allerdings nur als absolute Notfallmaßnahme. Das System sollte die Zeit bis zum Eintreffen eines Spenderherzens überbrücken, und tatsächlich hielt es den Patienten bis dahin – immerhin 64 Stunden – am Leben. Fatalerweise starb er aber dann zweieinhalb Tage nach dem letzten Eingriff.

Das nächste Kunstherz wurde erst wieder 1981 implantiert. Auch diesmal gelang es damit, den Patienten dank der Überbrückungshilfe die 55 Stunden bis zum Eintreffen eines menschlichen Herzens am Leben zu halten.

Dann folgten jene Versuche, die vermutlich die größte Publizität unter allen Experimenten der modernen Medizin überhaupt erlangten: die viermalige Dauerimplantation des Kunstherzens Jarvik-7 durch den Herzchirurgen William DeVries. Quasi über Nacht erlangte sein erster Patient 1982 am Medical Center der Universität von Utah in Salt Lake City Berühmtheit. Fast täglich berichteten die Medien über den Gesundheitszustand von Barney B. Clark. Reporter setzten alles daran, sich Zugang zur Intensivstation zu verschaffen, versteckten sich in Wäschekörben oder verkleideten sich als Ärzte. Als der Patient 112 Tage später infolge mehrerer Infektionen an so genanntem multiplem Organversagen starb, hatten die Medien über jedes Detail seiner medizinischen Probleme und Beschwerden regelrecht Buch geführt.

Fast zwei Jahre später unternahm DeVries den nächsten Versuch mit dem Jarvik-7, diesmal im Norton Audubon Hospital in Louisville (US-Bundesstaat Kentucky). Sein Patient William Schroeder lebte 620 Tage mit dem Kunstherzen – bis heute Rekord für solche Geräte. Doch forderte dies immensen Tribut von ihm: Schlaganfälle, Infektionen, Fieber und ein ganzes Jahr Ernährung über eine Sonde. Der dritte Empfänger des Jarvik-7 lebte 488 Tage, der vierte starb jedoch schon nach 10 Tagen. Zwar setzten einige Krankenhäuser später noch eine etwas kleinere Version des Jarvik-7 bei mehreren hundert Patienten mit Erfolg als Überbrückungshilfe bis zur Transplantation ein. Von der Idee eines permanenten Kunstherzens wandte sich die Mehrzahl der Fachleute jedoch ab.

Jahrelang gegen den Strom geschwommen

Zu den wenigen, die an dem Konzept festhielten, gehört David Lederman. Der Ingenieur hatte in der medizinischen Forschungsabteilung des amerikanischen Raumfahrtkonzerns Avco bereits jahrelang an der Entwicklung eines Kunstherzens gearbeitet. 1981 gründete er die Firma Abiomed. Er und seine Kollegen verfolgten die klinischen Versuche mit Jarvik-7 aufmerksam und tüftelten an Verbesserungen. Die Nachteile des bestehenden Systems:

➤ Die Antriebseinheit – ein außerhalb des Patienten arbeitender Druckluftkompressor – war zu sperrig und zu laut.

➤ Infektiöse Bakterien konnten leicht über die Eintrittspforten der Schläuche eindringen.

➤ Im Inneren des Kunstherzens gab es Stellen, an denen sich Blutplättchen und schließlich Blutkörperchen zu einem Thrombus zusammenlagern konnten. Wenn ein solcher Pfropf über die Blutbahn ins Gehirn gelangt, erleidet der Patient einen Schlaganfall.

Im Jahre 1988 beschloss das National Heart, Lung and Blood Institute, eines der US-amerikanischen Gesundheitsinstitute, keine weiteren Gelder mehr für Forschungen über künstlichen Herzersatz zu bewilligen. Die Mittel sollten stattdessen in die Entwicklung ▶

von so genannten Herz-Unterstützungssystemen fließen. Mit Vertretern anderer Forschungsgruppen eilte Lederman nach Washington, um Lobby-Arbeit gegen diesen Richtungswechsel zu betreiben. Zwar gelang es tatsächlich, die Forschungsaktivitäten an jeweils zwei Universitäten und Unternehmen wieder aufzunehmen. Doch das Projekt von Abiomed hat als Einziges bis heute überlebt. Das Unternehmen mit Hauptsitz in einem Büropark nördlich von Boston hat insgesamt rund 20 Millionen US-Dollar an öffentlichen Geldern erhalten. Im Jahr 2000 endete die staatliche Förderung; doch spülte der Börsengang im gleichen Jahr 96 Millionen Dollar in die Kasse.

Lederman und sein Team setzten beharrlich auf etwas, das andere Forscher bereits für eher überholt erachteten. Dieses überzeugte Festhalten am Ziel sei ein ganz entscheidender Punkt gewesen, betont der Ingenieur. „Niemand sonst war so fest überzeugt, dass kein anderer Weg zum Erfolg führt. Ich bin stolz, dass wir die Sache so ernsthaft angegangen sind.“ Gleichzeitig spielt bei ihm eine sehr persönliche Motivation mit: 1980 starb sein Vater plötzlich an einer Herzattacke.

Als Herzstück Elektromotoren

Anders als das alte Jarvik-7 wird AbioCor nicht von einem Druckluftkompressor angetrieben. Verborgen hinter einem metallenen Ring im Zentrum des neuen Geräts agiert sein Herzstück: ein Paar elektrischer Motoren, die das System aus Pumpen und Ventilen antreiben. Eine permanent hin- und herbewegte Hydraulikflüssigkeit sorgt dafür, dass zwei Plastikmembranen die rhythmischen Kontraktionen der inneren Wände des Herzens nachahmen (siehe den Kasten auf Seite 46/47, rechte Spalte)

Das ist nur eine von vielen Innovationen. Um völlig autonom zu agieren, benötigte das Gerät einen kleinen implantierbaren Regler, der die Schlagfrequenz des Kunstherzens an die körperliche Aktivität des Trägers anpassen kann. Die von Abiomed entwickelte Steuereinheit hat bislang das Format eines kleinen Taschenbuchs, wird in den Bauch implantiert und über innere Kabel mit dem Kunstherzen verbunden. Sensoren registrieren den Blutdruck in der rechten Kammer – dorthin strömt das Blut aus dem Körper zurück. Je nach Druck lässt der Regler das System 80- bis 150-mal in der Minute „schlagen“. Wenn diese Steuerung sich bei den klinischen Versuchen bewährt, dann werden ihre künftigen Komponenten auf die Größe eines Mikrochips schrumpfen, der in die Zentraleinheit von AbioCor passt.

Neu entwickelt wurde auch die Energiezufuhr für die Motoren. Sie kommt ganz ohne äußere Kabel aus, die sonst durch die Haut des Patienten hindurch verlegt werden müssten und eine potenzielle Eintrittspforte für Erreger wären. Beim AbioCor nimmt ein ebenfalls in

Offene ethische Fragen

Mit der Erprobung von AbioCor lebt die alte Debatte zum Kunstherzen wieder auf

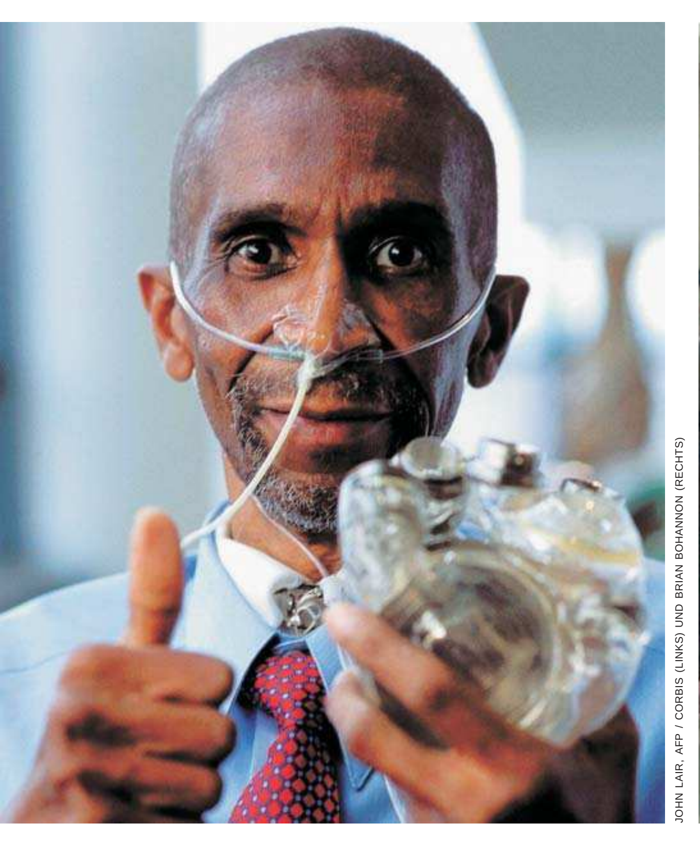
Schon in den 1980er Jahren, während der klinischen Versuche mit dem Kunstherzen Jarvik-7, äußerten Fachleute ethische Bedenken. Die Patienten würden körperlich und seelisch leiden, nicht zuletzt auch unter dem enormen Medienrummel. Seitdem AbioCor am Menschen erprobt wird, sind diese Fragen erneut aktuell. Hersteller Abiomed, die beteiligten Ärzte und die Medien schneiden dabei durchaus unterschiedlich ab.

„Die ethische Grundfrage ist hinsichtlich des Patienten noch immer die gleiche“, betont Arthur Caplan, Direktor des Zentrums für Bioethik an der Universität von Pennsylvania. Erst nach umfassender Aufklärung durch den Arzt sollte ein Patient aus freien Stücken der geplanten Maßnahme zustimmen. „Aber kann man von einem verzweifelten, sterbenden Patienten“, so Caplan, „ein echtes Abwägen erwarten?“ In dieser extremen Zwangslage gebe es wenig, für das man von einem Sterbenden nicht die Zustimmung erhalten könne. Vorbildlich sei aber die 13-seitige Zustimmungserklärung von Abiomed, die ausführlichst über die Risiken des Verfahrens aufkläre. Ausdrücklich lobt Caplan auch, dass die Firma für die Aufklärung von Patienten und deren Angehörigen unabhängige Anwälte finanziert. Auf der anderen Seite bezweifelt er jedoch, dass die richtigen Patienten an den Versuchen teilnehmen: „Bei manchen neuen Behandlungsansätzen macht es meines Erachtens keinen Sinn, sie zunächst an Schwerstkranken zu erproben. Denn wie will man dann krankheitsbedingte Verschlechterungen von solchen unterscheiden, die durch das Gerät verursacht wurden?“

George J. Annas, Professor an der School of Public Health der Universität Boston meint, dass der Patient in seiner Einverständniserklärung wesentlich detaillierter festlegen sollte, wie weit sein Sterben hinausgezögert werden darf, wenn schließlich nichts mehr zu machen ist. Niemand, so Annas, werde mit diesen Geräten lange leben. Es sei daher wichtig, das Ende einzuplanen. „Wie möchte man sterben? Wer soll unter welchen Umständen die Entscheidung treffen?“ In zwei Fällen stimmten Familienmitglieder zu, dass die Energieversorgung des AbioCor abgeschaltet wird, damit ihr todkranker Angehöriger endlich sterben konnte.

Ein weiterer Zündstoff für Kontroversen ist Abiomeds zurückhaltende Informationspolitik hinsichtlich der klinischen Versuche. Einen Medienrummel wie bei den Versuchen mit Jarvik-7 konnte die Firma erfolgreich verhindern, indem sie den Namen eines Operierten erst dreißig Tage nach der Implantation bekannt gibt. „Undichte Stellen“ in den Krankenhäusern zwangen die Firma allerdings mehrfach zu vorzeitiger Bekanntgabe. Doch betonen einige Ethiker, es sei notwendig, auch wirklich alle medizinischen Probleme zu veröffentlichen. Renee Fox, Sozialwissenschaftlerin an der Universität von Pennsylvania, merkt hierzu an, Abiomed habe zwar über negative Vorfälle meistens rechtzeitig berichtet. „Firma und Ärzte neigten aber dazu, solche Vorfälle nicht dem Gerät anzulasten.“ Jedes Mal sei versucht worden, erst einmal die Grunderkrankung des Patienten verantwortlich zu machen statt irgendeinen schädlichen Einfluss, der möglicherweise von dem Gerät ausging.

Den Journalisten schließlich werfen Ethiker vor, sie hätten überoptimistisch über AbioCor berichtet. So hatte eine hoffnungsvolle Titelgeschichte im Magazin „Newsweek“ den ersten Empfänger Robert L. Tools dazu gebracht, sich als Freiwilliger zu melden. Die Presse solle neue medizinische Verfahren nicht wie eine neue Heilslehre verkünden, fordert Ronald Munson, Professor für Wissenschafts- und Medizinphilosophie an der Universität von Missouri in St. Louis.





JOHN LAIR, AFP / CORBIS (LINKS) UND BRIAN BOHANNON (RECHTS)

Die ersten beiden Empfänger von AbioCor: Robert L. Tools (links), mit einem AbioCor in der Hand, erhielt sein Kunstherz im Juli 2001, starb aber Ende November; Tom Christerson (rechts mit seinem Physiotherapeuten) lebt seit September 2001 mit dem Gerät, seit April sogar zu Hause.

den Bauchbereich implantierter Akku genügend Ladung auf, um das Kunstherz für zwanzig Minuten ohne äußere Energiezufuhr anzutreiben. Nachgeladen wird er normalerweise ständig mittels elektromagnetischer Induktion, wie das heute bei jeder elektrischen Zahnbürste funktioniert. Dazu ist er an eine unter die Brusthaut implantierte elektrische Transferspule angeschlossen. Eine zweite, außen anliegende Spule, die von einem externen Akku gespeist wird, überträgt ihr neue Energie durch die Haut – bei minimaler Strahlenbelastung und Wärmeentwicklung. Der Patient kann die externe Batterie an einem Gürtel tragen, zusammen mit einem Überwachungssystem, das ihn rechtzeitig warnt, wenn sie leer zu werden droht.

Besonders wichtig war, AbioCor so auszulegen, dass im Blut möglichst keine Gerinnsel entstehen. Schon während seiner Zeit bei Avco hatte Lederman vier Jahre lang über Wechselwirkungen zwischen Blut und synthetischen Materialien geforscht. Die Gerinnungsgefahr verringert sich im AbioCor vor allem dadurch, dass die Blutplättchen darin gar keine Zeit haben, zu verklumpen. Denn das Blut fließt sehr schnell durch das Gerät, findet dort keine Flächen, an denen es stocken und sich vernetzen könnte. Alle Oberflächen, die in Kontakt mit dem Lebenssaft kommen, bestehen aus Angioflex – einem biologisch inerten Polyurethan. Obendrein sind die Kontaktflächen extrem glatt gehalten, denn Gerinnsel bilden sich bevorzugt auf Unebenheiten. „Wir mussten ein absolut nahtloses System entwickeln“, betont Lederman.

Zu großherzig für die Brust der meisten Frauen

Nach erfolgreichen Vorversuchen an Kälbern und Schweinen genehmigte die FDA im Januar 2001 klinische Versuche. Die Behörde wird den Erfolg an der Überlebensrate und an der Lebensqualität der Patienten messen. Nur Kranke, für die eine Herztransplantation nicht in Frage kommt, dürfen freiwillig an den Versuchen teilnehmen. Die Dimensionen von AbioCor schränken aber die Einsatzmöglichkeiten weiter ein: Das Gerät ist so groß, dass es überhaupt nur bei der Hälfte aller erwachsenen Männer und sogar nur bei 18 Prozent aller Frauen in den Brustkorb passt. Allerdings arbeitet die Firma bereits an einer kleineren Gerätegeneration, die einmal fast allen Patienten passen soll.

Während der Versuche trägt Abiomed die Kosten für die Geräte und deren Unterhalt. Krankenhäuser und Ärzte in den USA stellen Räumlichkeiten und alle medizinischen Leistungen bereit. Die Gesamtkosten einer einzigen Implantation nebst medizinischer und pflegerischer Betreuung liegen in den USA bei über einer Million Dollar.

Beim ersten Einsatz am Menschen mussten die Chirurgen Laman A. Gray Junior und Robert D. Dowling am Jüdischen Hospital in Louisville sieben Stunden operieren. Der damals 59-jährige Empfänger – Robert L. Tools, ein ehemaliger US-Marinesoldat – litt an Diabetes, Nierenversagen und Herzinsuffizienz und konnte vor der Operation im Juli 2001 vor Schwäche kaum mehr seinen Kopf heben. Nach dem Eingriff traten zunächst innere Blutungen und Lungenproblemen auf.

Zwei Monate später funktionierten seine Nieren jedoch wieder normal und er hatte genügend Kraft, um mehrmals an Ausflügen außerhalb des Krankenhauses teilzunehmen. Seine Ärzte hofften schon, er könne Weihnachten daheim verbringen. Doch er hatte weiterhin Blutungen, was es schwierig machte, die nötigen gerinnungshemmenden Medikamente zu verabreichen. Am 11. November erlitt Tools einen schweren Schlaganfall, der seine rechte Körperhälfte lähm-


AFB / CORBIS

Vor der Implantation: Die Chirurgen Laman A. Gray (links) und Robert D. Dowling (rechts) am Jüdischen Hospital in Louisville saugten die Luft aus AbioCor, bevor sie es am 13. September 2001 Tom Christerson einpflanzten. Die Maßnahme soll der Bildung von Blutgerinnseln vorbeugen.

te. 19 Tage darauf starb er an Komplikationen nach Magen-Darm-Blutungen.

Dem zweiten Empfänger eines AbioCor, dem 71 Jahre alten pensionierten Geschäftsmann Tom Christerson, erging es wesentlich besser. Er bekam das Gerät am 13. September 2001 eingepflanzt. Nach stetigen gesundheitlichen Verbesserungen verließ Christerson im März 2002 das Krankenhaus, um in einem Hotel in der Nähe zu wohnen. Dort konnten er und seine Familie lernen, selbstständig mit dem Gerät zurechtzukommen. Einen Monat später kehrte er schließlich nach Hause zurück. Seither kommt er nur zu regelmäßigen Kontrolluntersuchungen einmal pro Woche in die Klinik. Dabei nutzt er sein entsprechend verkabeltes Auto gleich auch als Generator für den Antrieb seines Kunstherzens.

Kunstherz mit Kinderkrankheiten

Am texanischen Herzinstitut in Houston implantierte O. H. „Bud“ Frazier zwei seiner Patienten das AbioCor. Dieser erfahrene Chirurg hält den Rekord an Herztransplantationen. Einer der Patienten lebte mehr als vier Monate mit dem Gerät, bevor er den Folgen eines Schlaganfalls erlag. Der zweite starb binnen eines Tages – nach zwanzigstündiger Operation – an nicht beherrschbaren Blutungen. Weitere Implantationen fanden am Los Angeles Medical Center der Universität von Kalifornien und an der Hahnemann-Universitätsklinik in Philadelphia statt. Der Patient in Los Angeles erlag knapp zwei Monate später einem multiplen Organversagen. Der andere Patient, der 51-jährige James Quinn, erhielt das AbioCor am 5. November 2001. Trotz eines leichten Schlaganfalls im Dezember konnte er im folgenden Monat in ein nahe gelegenes Hotel umsiedeln. Im Februar musste er allerdings auf Grund von Atemproblemen wieder stationär aufgenommen werden. Er litt an einer Lungenentzündung, die rasch lebensbedrohlich wurde. Quinn kam an ein Beatmungsgerät. Sein Zustand besserte sich zunächst nur langsam, Mitte Mai konnten ihn die Ärzte jedoch allmählich wieder vom Beatmungsgerät entwöhnen. Er musste aber weiterhin in der Klinik bleiben und starb Ende August.

Im Januar 2002 hatte Abiomed auf einer Pressekonferenz erste Zwischenergebnisse der klinischen Versuche präsentiert. Lederman lobte, AbioCor habe auch unter Bedingungen weiterfunktioniert, die jedes natürliche Herz massiv geschädigt oder gar zerstört hätten. So etwa auch dann noch, als Patienten unter schwerem Sauerstoffmangel im Blut oder an hohem Fieber von fast 41,7 Grad Celsius litten. Keiner der Patienten habe eine gerätebedingte Infektion erlitten.

Allerdings musste die Firma einen Konstruktionsfehler einräumen. AbioCor wird an den Resten der Vorhöfe des entfernten Herzens angeschlossen. Dabei kamen auch fingerhutförmige Stützen zum Einsatz, welche die verbliebenen Vorhofwände auseinander halten sollten (siehe die obere Abbildung im Kasten auf Seite 46). Bei zwei der verstorbenen Patienten hatten sich auf den Plastikstreben Blutgerinnsel gebildet. Da solche Verklumpungen, wenn sie sich loslösen, zu Schlaganfällen führen können, wird künftig auf diese Stützen verzichtet. Sie waren bei der Erprobung des Geräts in Kälbern erforderlich gewesen, sind beim Menschen aber überflüssig.

Anfang April erklärte die Firma, sie wolle vor dem weiteren Einsatz erst den Verlauf der Behandlung bei den ersten sechs Patienten genauer untersuchen. Doch gerade mal eine Woche später implantierten Ärzte in Louisville das Gerät erneut – diesmal ohne die Plastikstützen. Das Kunstherz arbeitete korrekt, doch starb der 61-jährige Patient binnen weniger Stunden an einer Lungenembolie. Die Operateure Laman Gray und Robert Dowling erklärten aber, der Blutpfropf habe sich nicht innerhalb des Kunstherzens gebildet.

Trotz aktueller Rückschläge sind die Chirurgen, die bislang das Gerät eingesetzt haben, vom Potenzial dieser Technik überzeugt. Dass sich Blutgerinnsel auf den Plastikstreben bildeten, sei nicht vorhersehbar gewesen, meint Frazier vom texanischen Herzinstitut. Dem pflichtet auch Gray bei: „Meiner Meinung nach ist das Gerät selbst sehr gut konstruiert und birgt keine erhöhte Gerinnungsgefahr.“ Er sei verblüfft, wie gut es bei den ersten klinischen Versuchen funktioniert habe. Doch berieten diese beiden Chirurgen die Firma auch schon bei der Konstruktion des Geräts und zeichneten für die meisten der Tierversuche verantwortlich.

Allerdings ist nicht jeder so zuversichtlich: „Ein Totalersatz des Herzens durch ein mechanisches Gerät wirft etliche Fragen auf, die bei der geringen Anzahl von Patienten in den bisherigen Versuchen nicht zu klären sind“, meint Claude Lenfant, Direktor des National Heart, Lung and Blood Institute. „Welche Lebensqualität kann ein Patient mit solch einem Totalersatz erwarten? Nutzt das wirklich klinisch etwas? Sind die Kosten dieser Therapie auch für die Gesellschaft tragbar?“ Sogar Robert K. Jarvik – der Entwickler des Jarvik-7, das vor zwanzig Jahren für Schlagzeilen sorgte – hält heute ein Kunstherz als Totalersatz für zu riskant: „Das Herz kom-

Beim Pumpen helfen statt ersetzen

Herz-Unterstützungssysteme bieten eine Alternative zum Totalersatz

Eigentlich sollten sie nur die Wartezeit bis zu einer Transplantation eines Spenderherzens überbrücken helfen: Herz-Unterstützungssysteme für die linke Herzkammer, englisch *left ventricular assist devices*, kurz LVAD. Sie bestehen aus einer Pumpe, die in Brustkorb oder Bauch implantiert und an die linke Herzkammer angeschlossen wird. Das ist jene Kammer, die sauerstoffreiches Blut aus der Lunge in den Körper pumpt.

Im November 2001 berichteten Forscher über Erfolge bei Patienten mit einer Herzinsuffizienz im Endstadium. 68 Patienten der Studie hatten das HeartMate, das derzeit gebräuchlichste LVAD, erhalten; 61 andere bekamen die konventionelle Therapie, einschließlich hochwirksamer Herzmedikamente. Nach einem Jahr lebte noch mehr als die Hälfte der Patienten mit einem LVAD, in der Kontrollgruppe hingegen nur noch ein Viertel. Zwei Jahre später lagen die Zahlen jeweils bei 23 und 8 Prozent. Die Obergrenze liegt beim HeartMate derzeit bei mehr als drei Jahren; der längste Überlebende aus der konventionell behandelten Gruppe starb hingegen nach 798 Tagen. „Das setzt einen neuen Maßstab bei der Behandlung dieser Erkrankung", freut sich Eric Rose, Chefchirurg am Columbia Presbyterian Medical Center in New York und leitender Wissenschaftler der Studie.

HeartMate, produziert von der Firma Thoratec im kalifornischen Pleasanton, ist dabei alles andere als perfekt. Viele Patienten bekamen schwere Infektionen, denn das Gerät ist über einen Schlauch durch die Haut hindurch an einen externen Akku angeschlossen. Einige Patienten starben sogar an technischen Fehlfunktionen, etwa an einem Motorschaden. Allerdings hat die Firma die derzeitige Version bereits verbessert und arbeitet an einer zweiten und dritten Gerätegeneration, die es auf Standzeiten von etwa acht beziehungsweise fünfzehn Jahren bringen soll.

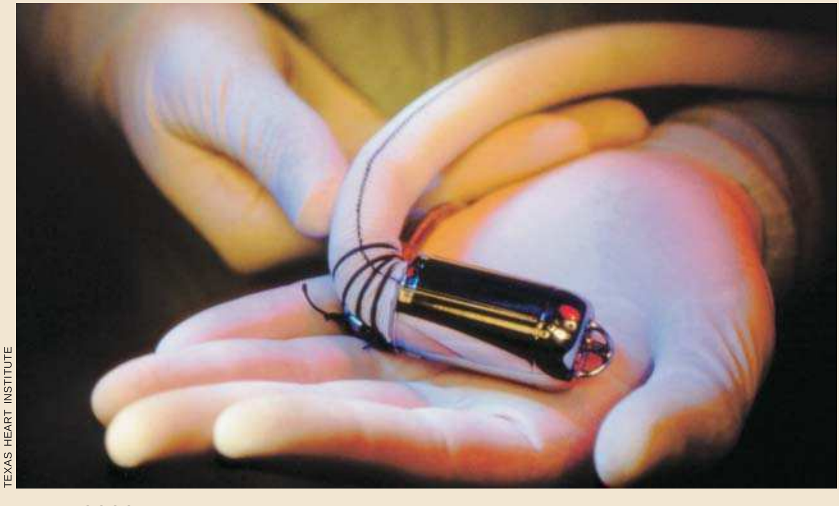
Ein weiteres LVAD ist das LionHeart, hergestellt von der Firma Arrow International in Reading (Pennsylvania). Das vollimplantierbare „Löwenherz", bei dem keine Kabel und Schläuche mehr durch die Haut durchdringen, wird ebenfalls bereits klinisch erprobt. Wie beim AbioCor läuft die Stromversorgung über Induktionsspulen durch die Haut. Ein weiteres System, das MicroMed DeBakey VAD, ist zwar auch komplett implantierbar, doch befördert es das Blut nicht stoßweise, sondern kontinuierlich in die Adern. Seine Befürworter preisen seine Effizienz und Zuverlässigkeit. Kritiker halten aber ein Pulsieren für unverzichtbar, um die Blutgefäße frei zu halten. Herzpionier Michael E. DeBakey, der 1964 erstmals erfolgreich einen koronaren Bypass legte, hat das Gerät zusammen mit einem seiner Patienten entwickelt: dem Nasa-Ingenieur David Saucier, der ein Spenderherz bekam. Das System wurde weltweit erstmals von Roland Hetzer am Deutschen Herzzentrum in Berlin implantiert, der im Juni auch weltweit erstmals das neuartige Berlin Heart INCOR I zwei Patienten einsetzte (siehe das Interview auf Seite 53/54).



THORATEC

HeartMate: Das meistgenutzte Herz-Unterstützungssystem wird in den Bauchraum implantiert. Angeschlossen an eine nicht mehr voll funktionstüchtige linke Herzkammer, hilft es ihr, sauerstoffreiches Blut in den Körper zu pumpen.

Robert K. Jarvik, Erfinder des alten Kunstherzens Jarvik-7 und heute Geschäftsführer der New Yorker Firma Jarvik Heart, hat das bislang winzigste Unterstützungssystem eingeführt. Jarvik 2000 ist so klein, dass es als Einziges in die linke Herzkammer eingesetzt werden kann. Wie das DeBakey VAD befördert es das Blut kontinuierlich. Das Gerät wird derzeit als Überbrückungshilfe bis zum Eintreffen eines Spenderherzens erprobt. In einigen Patienten soll es aber auch langfristig verbleiben. Jarvik glaubt, dass sein Gerät in manchen Fällen einem nicht extrem geschädigten Herzen helfen kann, sich wieder zu regenerieren – vielleicht in Kombination mit einer Stammzelltherapie (siehe den Kasten auf Seite 52).



TEXAS HEART INSTITUTE

Jarvik 2000: Als einziges Herz-Unterstützungssystem ist es so klein, dass es in die linke Herzkammer eingebaut werden kann. Robert K. Jarvik, der Erfinder des alten Jarvik-7-Kunstherzes, setzt heute auf solche Unterstützungspumpen.

Gebrochene Herzen

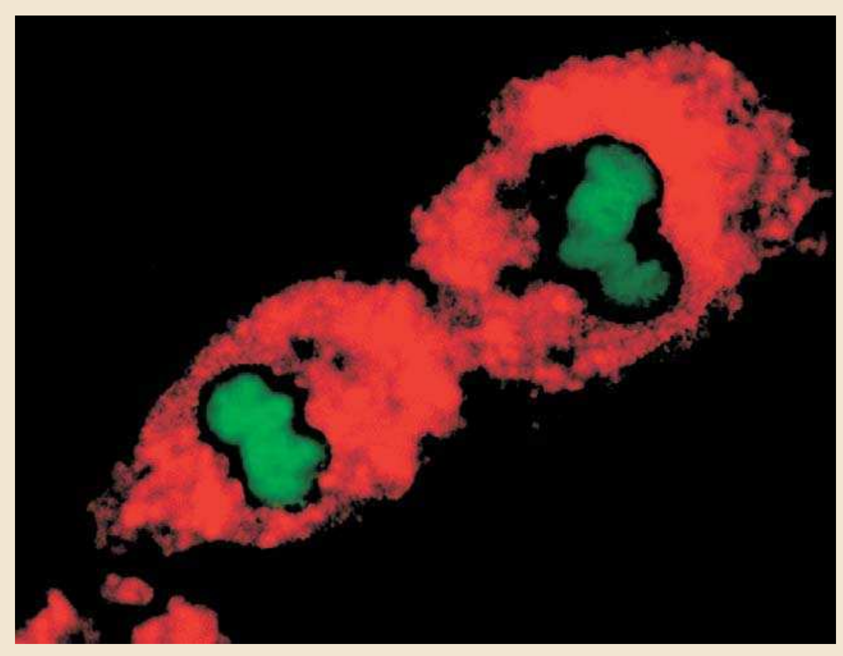
Stammzellen könnten sich einmal als die beste Medizin für geschädigte Herzen erweisen

Gelegentlich stellen unerwartete wissenschaftliche Befunde vertraute Erklärungsmuster auf den Kopf. Nach bisheriger Lehrbuchmeinung konnte das menschliche Herz sich nach einem Infarkt oder einer anderen Verletzung nicht regenerieren. Dies widerlegen zwei Studien, die unlängst in einer der wichtigsten medizinischen Fachzeitschriften, dem „New England Journal of Medicine“, veröffentlicht wurden. Demnach scheint es möglich, dass Herzmuskelzellen selbst im ausgewachsenen Organ noch neu entstehen. Sie gehen dabei offenbar aus undifferenzierten Stammzellen hervor, die auch im erwachsenen Körper vorkommen. Womöglich ebnet das den Weg für künftige Therapien, die eine natürliche Heilung fördern.

Die revolutionären Erkenntnisse stammen von zwei Forschungsteams, das eine am New York Medical College (NYMC), das andere an der Universität Udine in Italien. Die erste Gruppe fand chemische Marker für ein neues Wachstum von Muskelzellen im Herzgewebe von Patienten, die vier bis zwölf Tage nach einem Infarkt verstorben waren. Die zweite Gruppe untersuchte verstorbene männliche Patienten, die ein weibliches Spenderherz erhalten hatten. Zur Verblüffung fanden sich in den Herzen auch Stammzellen mit dem nur bei Männern vorkommenden Y-Chromosom. Die Zellen könnten aus dem Knochenmark der Empfänger eingewandert sein, aber auch aus Resten ihres eigenen Herzens, an die das Spenderherz angeschlossen wurde.

„Dies ist zumindest ein Hinweis, dass Stammzellen im Herzen existieren könnten“, meint Piero Anversa, Direktor des Instituts für Herzkreislaufforschung am NYMC. Es ginge jetzt darum, alle Belege dafür zu sammeln, dass man es wirklich mit einem ursprünglichen Zelltyp im Herzen zu tun habe. „Dann müssen wir erst einmal schauen, ob wir diese Zellen in geschädigten Herzbereichen für eine Reparatur mobilisieren können.“

Weitere Forscher versuchen es mit Stammzellen, die sie an anderer Stelle im Körper gewinnen. Philippe Menasché, Professor für Kardiovaskuläre Chirurgie am Bichat-Claude Bernard Hospital in Paris, hat einigen Patienten während einer Bypass-Operation Vorläufer von Muskelzellen aus ihren Beinen ins geschädigte Herzmuskelareal gespritzt. Erste Ergebnisse waren ermutigend: Die Herzmuskelwände wurden auf Grund von neuem funktionellem Gewebe dicker. Menasché dämpft dennoch die Erwartungen: „Solche Zellen könnten bestenfalls andere Behandlungen unterstützen.“ Es erscheine unrealistisch, dass man damit ein vom Infarkt zerstörtes Herz komplett regenerieren könne.



Herzmuskelzellen bei der Teilung: Sie entstammen dem Gewebe eines Patienten, der kurze Zeit nach einem Infarkt verstorben ist. Dies deutet darauf hin, dass entgegen bisheriger Lehrmeinung neue Muskelzellen als Ersatz für zerstörte entstehen können.

Einige Biotechnikfirmen nähren hingegen derartige Hoffnungen. Eines dieser Unternehmen ist Advanced Cell Technology in Worcester (Massachusetts), das letztes Jahr durch seine Versuche zum Klonen von Menschen Bekanntheit erlangte (siehe auch „die ersten geklonten menschlichen Embryonen“, Spektrum der Wissenschaft 01/2002, S. 12). Es hat aus embryonalen Stammzellen schlagende Herzmuskelzellen gezüchtet. Jetzt versucht die Firma, daraus transplantierbare Gewebestückchen herzustellen, mit denen sich größere geschädigte Herzareale reparieren ließen. „Am Ende wollen wir ein komplettes Herz in der Kulturschale erzeugen“, erklärt Robert Lanza, Vizepräsident für medizinische und wissenschaftliche Entwicklung. Dafür nötig sind nicht nur Herzmuskelgewebe und Blutgefäße, sondern auch ein biologisch abbaubares Grundgerüst, mit dem sich das Ganze in Herzform züchten ließe. Wie weit ist es noch bis zu einem biokünstlichen Herzen? Lanza: „In zehn Jahren könnten wir ein funktionierendes Organ haben, in 15 Jahren vielleicht mit klinischen Versuchen starten.“

plett herauszuschneiden, ist fast nie eine gute Idee.“ 1982 hätte man noch nicht gewusst, dass das Organ sich bei bestimmten Erkrankungen wieder erholen kann, wenn es vorübergehend unterstützt werde. „Nur in Extremfällen sollten wir deshalb das eigene Herz des Patienten entfernen.“

Oberstes Gebot ist nun, das Risiko von Schlaganfällen zu senken. Ursprünglich hatten die Ärzte gehofft, sie könnten dem Problem durch gering dosierte gerinnungshemmende Medikamente vorbeugen. Doch waren einige der Patienten so schwer krank, dass sie selbst diese schwache Dosis nicht vertrugen. Ihre Vorerkrankungen machten sie anfällig für innere Blutungen. Das bedeutete eine

heikle Gratwanderung für die Ärzte: Ein Zuviel der Medikamente lässt den Patienten womöglich verbluten, ein Zuwenig könnte einen Schlaganfall bedeuten.

Trotz der Dringlichkeit von Verbesserungen ist Lederman mit den bisherigen Ergebnissen zufrieden. Die erste Zielvorgabe – Patienten für mindestens sechzig Tage am Leben zu erhalten – habe AbioCor bei seiner Erprobung erreicht: Immerhin hielten vier der Empfänger länger durch, zwei davon sogar sehr viel länger. Bringen die meisten der nächsten Patienten ähnlich gute Ergebnisse und gelingt es gleichzeitig, Komplikationen wie Schlaganfälle zu verhindern, dann, so Lederman, werde man bei der FDA eine Freigabe für den generellen klinischen Einsatz des Systems beantragen. Der wird aber auf jeden Fall auf sterbenskranke Patienten beschränkt bleiben. Lederman: „Ich denke, wir haben nun überzeugende Argumente dafür, dass wir Patienten, deren Lebenserwartung höchstens noch dreißig Tage beträgt, zu vielen weiteren Monaten mit hoher Lebensqualität verhelfen können." Einige Medizinethiker halten das hingegen für fragwürdig. Menschen an der Schwelle des Todes würden schließlich fast jeder Behandlung ohne Berücksichtigung der Konsequenzen zustimmen, wenn sie ihnen nur ein wenig Hoffnung auf Weiterleben verspricht (siehe den Kasten auf Seite 48).

Auch bleibt die Frage, wie eine akzeptable Lebensqualität definiert werden kann. Schon 1981 schrieb Jarvik, ein ideales Kunstherz müsse so unaufdringlich und zuverlässig arbeiten, dass dem Patienten gar nicht bewusst wird, dass er es trägt (SdW 03/1981, S. 16). Erfüllt AbioCor diese Vorgabe? Carol Tools meint, ihrem Mann sei durchaus bewusst gewesen, dass das ständige leise Surren des AbioCor das Pochen seines eigenen Herzens ersetzte. Dafür habe allein schon der Umstand gesorgt, dass er sich ständig um die Energieversorgung kümmern musste. „Manchmal", sagt sie, „lag er da und lauschte ihm nach. Dann hatte er es auch wieder vergessen." Dennoch glaubt sie, seine Lebensqualität sei in den letzten Monaten gut gewesen. Carol: „Leider war die Spanne, die uns blieb, kürzer als wir gehofft hatten". Doch fügt sie hinzu: „Robert hat seine Entscheidung nie bereut." ■

Steve Ditlea *arbeitet als freier Journalist in Spuyten Duyvil, New York. Mit der Thematik beschäftigt er sich seit 1978.*

Weblinks finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis".*

INTERVIEW



BERLIN HEART

Roland Hetzer
ist Direktor des Deutschen Herzzentrums in Berlin, einer der weltweit größten Kliniken für die Herztransplantation. Um die Wartezeit bis zur Transplantation zu überbrücken, implantierte er 1987 als Erster in Deutschland einem Patienten ein künstliches Herz-Unterstützungssystem. Jüngstes Produkt der ständigen technischen Verbesserungen: die gerade noch 200 Gramm schwere Berliner Axialflusspumpe „Incor I", die Hetzer im Juni 2002 erstmals zwei Patienten implantierte. Heute sieht er für solche Systeme bereits ein neues Einsatzfeld: als Dauerlösung ähnlich einem Herzschrittmacher. Manchem Patienten verhelfen sie sogar wieder zur Genesung.

Glücklich mit der zweiten Pumpe ...

Spektrum der Wissenschaft: Im vergangenen Jahr haben in Deutschland 407 Menschen ein Spenderherz erhalten. Wie viele Patienten benötigen nach Ihrer Einschätzung ein Ersatzherz?

Prof. Dr. Hetzer: Offiziell wurden 614 Patienten 2001 neu für eine Transplantation angemeldet. Diese Zahl spiegelt allerdings nur ein Teil der Wirklichkeit. Wenn man die heutigen Auswahlkriterien zu Grunde legt, schätze ich, dass allein in Deutschland jährlich etwa zwei- bis dreitausend Patienten für eine Transplantation in Frage kommen. Nach wie vor wird aber an diese Möglichkeit von vielen Ärzten und Patienten zu selten gedacht. Verständlich, denn wir haben ohnehin schon einen eklatanten Mangel an Spenderorganen. Rund ein Viertel der Patienten stirbt auf der Warteliste. Eine Wartezeit von durchschnittlich zehn bis zwölf Monaten ist einfach zu lang.

Spektrum: Bieten technische Kunstherzen einen Ausweg?

Hetzer: Etwa jeder zweite Patient auf der Warteliste kommt in der Tat für ein technisches System in Frage. Allerdings wurde dadurch insgesamt die Zahl der benötigten Spenderherzen bislang nicht geringer.

Spektrum: Warum das?

Hetzer: Wir setzen heute fast ausnahmslos Herz-Unterstützungspumpen ein, in Deutschland pro Jahr etwa 150 Stück, Tendenz steigend. Diese Systeme werden zwar landläufig auch als Kunstherzen bezeichnet, sind aber keine. Ihre Aufgabe ist ja nur, einem geschwächten Herzen bei der Arbeit zu helfen. Diese Systeme werden derzeit noch fast ausschließlich als Überbrückungshilfe bis zu einer Transplantation eingesetzt. Das lässt die Zahl der benötigten Spenderherzen insgesamt nicht sinken. Denn ein Patient wird früher oder später dann eben doch eines erhalten.

Spektrum: Welche Zeiträume lassen sich maximal mit derartigen Geräten überbrücken?

Hetzer: Die längste Spanne bis zur Transplantation liegt in unserer Klinik bei 794 Tagen. Weltweit sind bereits Tausende dieser Systeme eingesetzt worden, einige Patienten haben damit sogar mehr als fünf Jahre überbrückt.

Spektrum: Gäbe es genügend Spenderherzen, hätte vermutlich bis heute niemand solche technischen Lösungen entwickelt?

Hetzer: Oh doch! Als die Entwicklung von Kunstherzen um 1950 begann, war es das optimistische Ziel, eine technische Dauerlösung zu bauen. Allerdings gab es bei der klinischen Erprobung so schreckliche Misserfolge, dass die Geräte in den USA bald verboten wurden. Wenige Jahre später wurden dann die Möglichkeiten der Transplantation so gut, dass sie die Kunstherzentwicklung überholten. Erst das etwas bescheidenere Konzept, Unterstützungssysteme nur vorübergehend als Überbrückungshilfe bis zu einer Transplantation zu nutzen, hat es dann möglich gemacht, sie klinisch einzusetzen

INTERVIEW

und zu verbessern. Heute nähern wir uns dem ursprünglichen Ziel: Die Systeme sind inzwischen so ausgereift, dass wir sie erstmals versuchsweise sogar als Dauerlösung einsetzen.

Spektrum: Für wen kommt das in Betracht?

Hetzer: Wer älter als 65 Jahre ist oder zum Beispiel an Diabetes oder Krebs leidet, bekommt grundsätzlich kein Spenderherz. Solchen Patienten kann jetzt unter Umständen eine technische Lösung helfen. Ein Beispiel: Vor anderthalb Jahren bin ich aus einem Krankenhaus in Mittelhessen angerufen worden. Da lag ein 72-jähriger Infarktpatient, den die Ärzte bereits aufgegeben hatten. Die Angehörigen haben sich aber dahinter geklemmt, und so haben wir ihn hier nach Berlin genommen und ihm eine Unterstützungspumpe eingebaut. Der Patient lebt heute noch und ist ganz glücklich damit. Klar ist jedoch, dass er immer auf das Gerät angewiesen sein wird. Wir wissen seit wenigen Jahren aber auch, dass wir bei manchen jüngeren Patienten solche Systeme nach einiger Zeit sogar wieder ausbauen können, ohne dass sie zurück auf die Warteliste müssen.

Spektrum: Wie ist das möglich?

Hetzer: Manch krankes Herz kann sich dank der Unterstützung wieder erholen.



Herz-Unterstützungspumpen werden einmal so selbstverständlich sein wie heute Herzschrittmacher

Wir waren die Ersten weltweit, die das entdeckt haben. Im September 1994 hatten wir einem damals 37-jährigen Patienten ein Unterstützungssystem implantiert. Fünf Monate später hatte sich sein eigenes Herz völlig erholt, und wir haben das Gerät ausgebaut. Der Patient lebt bis heute ohne Unterstützungssystem weiter. Mittlerweile haben wir das Verfahren bei 31 Patienten wiederholt. Allerdings gibt es keine Erfolgsgarantie. Ein Drittel hat später erneut eine Herzinsuffizienz bekommen, einige mussten doch ein Spenderherz erhalten.

Spektrum: Können Sie denn vorab jene Patienten erkennen, denen ein Unterstützungssystem zur Gesundung verhelfen würde?

Hetzer: Das wäre natürlich ideal, geht aber leider noch nicht. Wir haben bislang keine Parameter dafür. Daran wird aber weltweit fieberhaft geforscht.

Spektrum: Sehen Sie angesichts solcher Erfolge mit den Unterstützungspumpen überhaupt einen medizinischen Sinn für den Einsatz echter Kunstherzen?

Hetzer: Ein Kunstherz im eigentlichen Sinne ist derzeit nur das AbioCor, das jetzt bei sieben Patienten weltweit erprobt worden ist. Die Ergebnisse sind auch auf Grund des ohnehin schon schwierigen Gesamtzustands der Patienten schlecht, sechs sind bereits gestorben.

Es ist dennoch ein faszinierendes Konzept. Zum ersten Mal gibt es tatsächlich ein voll implantierbares künstliches Herz.

Ein grundsätzlicher Nachteil wird aber immer sein, dass bei einem technischen Versagen keine Zeit mehr für eine andere Therapie bleibt. Bei einem Unterstützungssystem würde den Patienten immer noch sein eigenes Herz zumindest so lange am Leben halten, dass wir eine Chance auf eine weitere Behandlung hätten.

Spektrum: Für welche Menschen kommt es dann überhaupt in Frage?

Hetzer: Ein Totalersatz wie AbioCor kommt prinzipiell nur für eine ganz kleine Patientengruppe in Betracht. Etwa für junge Menschen, die auf Grund ihrer Vorerkrankung auch ein Spenderherz rasch immunologisch zerstören würden und deren Herz so stark geschädigt ist, dass selbst ein Unterstützungssystem nicht mehr helfen kann. In so einem Fall wollen auch wir hier in Berlin das AbioCor vermutlich noch in diesem Jahr einsetzen.

Spektrum: Werden Herz-Unterstützungspumpen einmal so selbstverständlich werden wie heute schon Herzschrittmacher?

Hetzer: Ich denke ja. Allerdings wird ihr Einsatz noch lange auf schwer kranke Patienten beschränkt bleiben. Denn ein prinzipielles Problem wird immer sein, dass sich an allen künstlichen Oberflächen, die man in den Blutstrom einbringt, eher als sonst Blutgerinnsel bilden können. Und der hohe Energiebedarf macht es leider auf absehbare Zeit weiterhin erforderlich, dass der Patient externe Akkus mit sich tragen muss. Es gab deshalb vor etwa einem viertel Jahrhundert schon mal die Idee, ein atomgetriebenes Kunstherz zu bauen. Das wäre die einzig denkbare Möglichkeit, um von den schweren Batterien weg zu kommen, ist aber aus nahe liegenden Gründen illusorisch.

Das Interview führte **Bernhard Epping**. Der promovierte Biologe arbeitet als freier Journalist mit Schwerpunkt Biologie und Medizin in Tübingen.

Weitere Infos zu Unterstützungssystemen aus Berlin:
www.berlinheart.de
Deutsches Herzzentrum Berlin:
www.dhzb.de

SOZIOBIOLOGIE

Steuern Bakterien die Evolution der Insekten?

Wurde die große Artenvielfalt der Insekten durch einen Schmarotzer ausgelöst? Zumindest lebt der Mikroorganismus *Wolbachia* als Parasit in den Zellen auffallend vieler Fliegen, Wespen und Käfer, aber auch in Asseln und Fadenwürmern. Sein großer Einfluss auf die Vermehrung seiner Wirte könnte bei der Bekämpfung einiger schwer besiegbarer Seuchen helfen.

Von Laurence D. Hurst und James P. Randerson

Falls es seiner eigenen Vermehrung nützt, kann ein Krankheitserreger seinen Wirt ruhig umbringen. Aber ein Parasit, der sich nur über dessen Eizellen verbreiten kann, sollte eigentlich das Wohlergehen des Wirts nicht allzu sehr beeinträchtigen – sollte man meinen.

Doch weit gefehlt. Zwar ist das Bakterium *Wolbachia* ein solcher Schmarotzer. Der Parasit lebt in den Zellen einer Reihe wirbelloser Tiere, vermehrt sich nur in deren Zellen und verbreitet sich dadurch, dass er auch die Eizellen der von ihm infizierten Weibchen befällt. So hangeln sich die kleinen Organismen von Generation zu Generation.

Allerdings verhält sich dieser weit verbreitete Kostgänger gegenüber seinen Wirten alles andere als harmlos. Er schädigt sie massiv, indem er in ihre Fortpflanzung eingreift. Dazu verwendet er in den einzelnen Tiergruppen unterschiedliche Tricks. In manchen Fällen tötet er männliche Nachkommen, in anderen wandelt er männliche Embryonen in weibliche um. Oft verhindert das Bakterium sogar generell eine Nachkommenschaft zwischen infizierten Männchen und parasitenfreien Weibchen. Auch Tiere, die von verschiedenen Wolbachia-Stämmen befallen sind, können oft miteinander keinen Nachwuchs bekommen. Andererseits gibt es Tiere, die sich ohne diesen Mikroorganismus gar nicht vermehren können. Dazu zählt ein verheerender Parasit des Menschen, den man zukünftig vielleicht mit Antibiotika eindämmen könnte (siehe „Freispruch für den Fadenwurm. Bakterien verursachen Flussblindheit“, SdW, 07/2002, S. 10).

Die Wissenschaftler entdecken erst jetzt allmählich, wo das Bakterium überall vorkommt und wie es in die Fortpflanzung seiner Wirte eingreift. Mediziner wollen dies ausnutzen, um von Insekten übertragene Tropenkrankheiten, vor allem Malaria und die Schlafkrankheit, zu bekämpfen.

Warum manipulieren die Mikroben die Vermehrung ihrer Wirte so stark? Die Antwort ist offenbar recht einfach: Männliche Tiere können diese Bakterien nicht selbst verbreiten. Sie werden nur von den Weibchen – mit deren Eiern – weitergegeben. Die Parasiten leben zwar auch in Zellen der Männchen, doch die winzigen Spermien entledigen sich solchen Ballastes. Wolbachia-Bakterien sind zu ihrer Verbreitung somit auf die weiblichen Wirte angewiesen, oder soziobiologisch ausgedrückt: Ihr Reproduktionsinteresse ist eng an die Weibchen und deren Eizellen gekoppelt. In männlichen Wirten sind die Mikroben gewissermaßen in einer evolutionären Sackgasse gefangen.

Dieses Manko verkehrte sich in der Evolution jedoch in für die Parasiten vor-

IN KÜRZE

➤ Bakterien der Gattung *Wolbachia* leben in den Zellen wirbelloser Tiere, etwa in Insekten, Krebstieren und Fadenwürmern. Die besonders kleinen Mikroben wurden vor fast achtzig Jahren entdeckt. Erst Anfang der 1970er Jahre stellte sich heraus, dass diese Bakterien der Grund dafür sind, warum manche gleich erscheinenden Moskitogruppen sich nicht kreuzen lassen.

➤ Die parasitischen Bakterien bewohnen ihre Wirtslinien seit vielen Jahrmillionen. Sie fanden verschiedene Tricks, zu ihren eigenen Gunsten in die Fortpflanzung ihrer Wirte einzugreifen. Das könnte deren Evolution vorangetrieben haben.

➤ Der Mikroorganismus Wolbachia ist mit den so genannten Rickettsien verwandt, die Fleckfieber und andere bedeutende Infektionskrankheiten verursachen.

➤ Bisher galt das Bakterium Wolbachia für den Menschen als ungefährlich. Doch kürzlich machte es Schlagzeilen als Parasit eines Fadenwurms, der die in den Tropen häufige Flussblindheit verursacht. Andererseits möchten Tropenmediziner mit Hilfe des Parasiten gegen von Insekten übertragene Krankheiten wie Malaria und die Schlafkrankheit vorgehen.

Wenn Wolbachia-Bakterien eingreifen, bekommen Zweipunkt-Marienkäfer nur Töchter. Die Bakterien töten die männlichen Larven.

teilhafte Strategien. Sie beeinflussen die Fortpflanzung ihrer Wirte derart, dass auch die in männlichen Wirten gefangenen Bakterien indirekt die Verbreitung des eigenen Stammes unterstützen. Doch es scheint, dass nicht nur auf Seiten der Parasiten Selektionskräfte wirksam waren. Die von ihnen heimgesuchten Tiere haben manche Gegenstrategien entwickelt. Möglicherweise trieben die Mikroben sogar die Aufspaltung von Wirtsarten in neue Arten voran.

Was die Auswahl ihrer Gastgeber betrifft, sind die Wolbachia-Bakterien nicht wählerisch. Sie hausen in erstaunlich vielen Arten von Insekten und anderen wirbellosen Tieren, so etwa in vielen Krebstieren – darunter besonders Asseln und Süßwassergarnelen – sowie auch in Milben und Fadenwürmern. In Zellen von Wirbeltieren wurden die Parasiten bisher aber nicht nachgewiesen.

Zu den am häufigsten mit Wolbachia-Mikroben befallenen Gruppen dürften jedoch die Insekten gehören. Mitte der 1990er Jahre fanden John H. Werren und seine Kollegen von der Universität Rochester (US-Bundesstaat New York) den Erreger in rund 17 Prozent der von ihnen geprüften 154 Insektenarten aus Panama.

Wie neuere Studien andeuten, könnte der Anteil noch wesentlich höher liegen. Nach einer Erhebung von Marjorie Hoy und Jay Jeyaprakash von der Universität von Florida in Gainesville mit einer anderen Methode könnten über drei Viertel der untersuchten Insektenarten infiziert sein. Außerdem hatte Werrens Team von jeder Art nur relativ kleine Stichproben genommen. Als Greg Hurst und seine Mitarbeiter vom University College London und der Universität Cambridge eine einzelne Insektenpopulation gründlicher durchmusterten, die von mehreren gut untersuchten Wolbachia-Arten befallen ist, entdeckten sie die Parasiten in etwa jedem zehnten Tier. Das bedeutet, dass man sie bei geringen Stichproben leicht übersieht.



FRANCIS M. JIGGINS

Zu den zahlreichen Wirtsarten des Parasiten Wolbachia gehört der afrikanische Fleckenfalter *Acraea encedon.* Alle mit dem Bakterium befallenen männlichen Embryonen des Schmetterlings sterben ab – mit ihnen die Bakterien. So helfen sie bei ihrer rascheren Verbreitung über weibliche Tiere.

Nach unserer eigenen Schätzung könnten über zwanzig Millionen wirbellose Tierarten diese Bakterien beherbergen. Der Wert hängt auch davon ab, wie viele Millionen Insektenarten es gibt. Noch gehen die Meinungen darüber auseinander. Trotzdem lässt sich jetzt schon erahnen, dass die Wissenschaft bei der Erforschung der Wolbachia-Bakterien noch ganz am Anfang steht und dass wir erst die Oberfläche dieser gewichtigen Erscheinung sehen.

Für das Leben der Wirtstiere kann die Infektion mit dem Parasiten Wolbachia ganz verschiedene Folgen haben. Häufig verringern die Bakterien in befallenen Populationen den Anteil der Männchen erheblich. Bei dem afrikanischen Edel- oder Fleckenfalter *Acraea encedon* beispielsweise kommen mancherorts nur noch verschwindend wenige Männchen vor. Gleiches gilt für einige Populationen der verbreiteten Rollassel *Armadillidium vulgare*.

Bei dem afrikanischen Schmetterling sorgt für das starke Ungleichgewicht der Geschlechter in den zu neunzig Prozent befallenen Populationen ein Wolbachia-Stamm, der infizierte Männchen schon vor dem Schlüpfen der Raupen abtötet. Weibchen aus gleicher Brut bleiben am Leben. Aus Sicht der Bakterien könnte dies Vorteile bringen: Die Mikroben, die ▶

sich gewissermaßen opfern, helfen so vermutlich ihren Stammesbrüdern in den weiblichen Geschwistern ihrer Opfer. In den männlichen Raupen wären sie ohnehin verloren, weil die Falter-Männchen sie ja später nicht durch Sperma verbreiten würden. Nun geben die toten Embryonen eine gute erste Mahlzeit für die frisch geschlüpften Raupenweibchen ab und schaffen ihnen so vermutlich einen günstigen Start – und damit auch ihren parasitären Bewohnern einen Vorteil.

Der gleiche Zusammenhang ist für einen Käfer schon belegt. Die Phase direkt nach dem Schlüpfen, bevor sie die ersten Blattläuse finden, ist für die Larven des Zweipunkt-Marienkäfers, *Adalia bipunctata*, besonders kritisch. Eine Sondermahlzeit ist daher sehr willkommen.

Bei den Asseln kommt der Weibchenüberschuss durch einen anderen Trick der Mikroben zu Stande. Die angehenden Männchen entwickeln sich während der Embryonalentwicklung zu Weibchen. Nun enden die Bakterien nicht in einer Sackgasse, sondern können mit den Eiern ihrer Wirtin in die nächste Generation gelangen.

Die Frage ist, ob sich der krasse Männchenmangel auf die Paarungsstrategien der Insekten auswirkt. Normalerweise sind die Weibchen bei der Partnerwahl wählerischer als die Männchen. Dies hängt damit zusammen, dass Eier im Verhältnis zu Spermien rar sind und Weibchen mit den vergleichsweise wenigen großen, nährstoffreichen Eiern mehr in die Fortpflanzung investieren. So erklären Evolutionsbiologen, warum normalerweise die Männchen um die Weibchen werben und die Weibchen sich ihre Partner aussuchen können.

Verkehrte Geschlechtsrollen

Ändert sich das, wenn schließlich sehr viele Weibchen, aber kaum mehr Männchen vorhanden sind? Tatsächlich beobachteten Francis M. Jiggins und seine Kollegen von der Universität Cambridge in stark mit dem Wolbachia-Bakterium befallenen Populationen des Schmetterlings *Acraea encedon* untypische Verhaltensmuster. Statt dass die Weibchen sich weiträumig verteilen, wie man es erwarten würde, finden sie sich zuhauf auf kleinen Grasflecken ein. An einer Stelle zählten die Forscher auf 200 Quadratmetern 350 Weibchen. Solche Ansammlungen fanden Biologen sonst nur bei Männchen, denn bei vielen Tieren stellen sich die Männchen als Gruppe für potenzielle Partnerinnen zur Schau.

Ob die Treffen der Schmetterlingsweibchen umgekehrt dem gleichen Zweck dienen, ist noch unklar. Zumindest dürften es die Weibchen wirklich auf Paarungspartner abgesehen haben. Wie Jiggins beobachtete, bilden an solchen Sammelstellen noch nicht begattete Weibchen die Überzahl. Er hatte zunächst auch festgestellt, dass die Mehrzahl der schon begatteten Weibchen nicht mit Wolbachia-Bakterien infiziert waren. Das schien zu bedeuten, dass die Männchen Wolbachia-freie Weibchen bevorzugen, also eine Wahl treffen. Leider ließ sich dieses Ergebnis in einer neuen Studie nicht wiederholen, sodass die Frage offen bleibt.

Das Verhalten der Rollasseln, bei denen aus männlichen Embryonen Weibchen entstehen, haben Thierry Rigaud und seine Mitarbeiter von der Universität Poitiers in Südfrankreich erforscht. Die Assel-Männchen paaren sich möglichst nicht mit solchen nachträglichen Weibchen. Und wenn sie dies tun, geizen sie mit Sperma.

Wir haben die Evolution des Verhaltens in solchen Situationen mathematisch modelliert. Tatsächlich sollte sich mit der Zeit das wählende Geschlecht umkehren, wenn irgendwelche Faktoren das Geschlechterverhältnis entsprechend

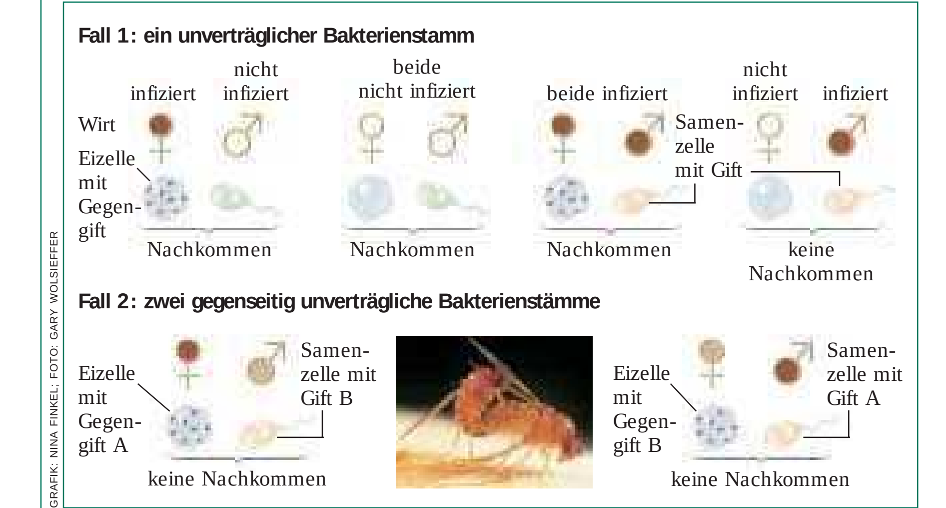
Nachkommen unmöglich

Saboteure in Samenzellen

Das parasitische Bakterium Wolbachia, Bewohner unzähliger wirbelloser Tiere, stört die normale Fortpflanzung seiner Wirte besonders oft durch gezielte Sabotage der Keimesentwicklung. Manche Stämme des Parasiten versehen die Spermien ihrer Quartiergeber mit einem Gift, das in die Eizelle gelangt. Dieses Gift scheint die Proteine zu verändern, die sich an die Erbsubstanz DNA anlagern. Dadurch kondensieren die Chromosomen der Spermienzelle bei der Verschmelzung mit der Eizelle auf abnorme Weise.

Ist auch das Weibchen mit demselben Wolbachia-Stamm infiziert, weisen deren Eizellen ein Gegengift auf. Doch nicht infizierte Weibchen bekommen mit infizierten Männchen keinen Nachwuchs (Fall 1). Dank dieses Mechanismus breitet sich der Parasit in Populationen aus. Wie schnell das manchmal geht, zeigten Michael Turelli von der Universität von Kalifornien in Davis und Ary A. Hoffmann von der La Trobe Universität (Australien) für den Riverside-Stamm, der im Osten der Vereinigten Staaten in der Taufliegenart *Drosophila simulans* lebt. Dessen Verbreitungsfront stößt jährlich etwa hundert Kilometer weiter vor. Diese Eigenschaft möchten Gentechniker etwa bei Moskitos ausnutzen, die Krankheiten wie Malaria übertragen.

Mitunter tritt mehr als ein solcher Wolbachia-Stamm auf, und das Gegengift des einen wirkt nicht gegen das Gift des anderen (Fall 2). Paarungen zwischen Tieren, die je einen der unverträglichen Bakterienstämme beherbergen, sind dann fruchtlos. Ist erst die gesamte Wirtspopulation verseucht, spaltet sie sich in zwei unvereinbare Untergruppen, die sich vielleicht sogar weiter zu getrennten Arten entwickeln können.



GRAFIK: NINA FINKEL; FOTO: GARY WOLSIEFFER

verschieben. Was geschieht aber mit dem Parasiten, wenn infizierte Weibchen keinen Sexualpartner finden? Nach unseren Simulationsrechnungen würde der Mikroorganismus aus der Population verschwinden, wenn die Männchen zuverlässig nur nicht-infizierte Partnerinnen wählen. Allerdings würde ein gelegentlicher Seitensprung genügen, um den Parasiten in der Population zu halten – was ja auch geschieht.

Doch rollenvertauschte Partnerwahl ist nur eine mögliche Auswirkung des Schmarotzers Wolbachia auf das Geschlechtsleben seiner Wirte. Vielleicht noch faszinierender erscheint sein Einfluss, wenn befallene männliche Embryonen der Rollassel *Armadillidium vulgare* in Weibchen umgewandelt werden. An sich ist die Manipulation einfach. Auch Asseln mit männlichem Erbgut tragen sämtliche Gene, die zur Entwicklung eines Weibchens notwendig sind. Damit sich das Tier zum Männchen entwickelt, muss lediglich eine spezielle Drüse in der frühen Entwicklung einen Schuss Männchen-induzierendes Hormon liefern. Die Parasiten verhindern, dass ihr embryonaler Wirt diese Drüse ausbildet – und das Tier wird ein Weibchen.

In manchen Populationen der Rollassel haben die Bakterien für ihren Wirt die Aufgabe übernommen, das Geschlecht festzulegen. Bei diesen Asseln verfügen normale Männchen – umgekehrt wie der Mensch – über zwei gleiche geschlechtsbestimmende Chromosomen (bei ihnen ZZ genannt); normale Weibchen tragen zwei unterschiedliche Chromosomen (W und Z); nachträgliche Weibchen besitzen aber wie normale Männchen zwei Z-Chromosomen.



THIERRY RIGAUD ET AL., UNIVERSITY OF POITIERS; KLEINES FOTO: BLICKWINKEL

Wenn das Bakterium Wolbachia zuschlägt, entstehen aus männlichen Embryonen von Rollasseln weibliche Tiere. Denn nur durch die Eier von Weibchen wird der Parasit an die nächste Wirtsgeneration weitergegeben.

Strategie: Weibchen-Übermacht

Daraus ergibt sich ein klares Muster. Nur die wenigsten Eizellen eines mit den Bakterien infizierten normalen WZ-Asselweibchens sind parasitenfrei. Ein solches Weibchen bekommt deswegen hauptsächlich Töchter: einerseits normale Weibchen mit der weibchentypischen Chromosomenausstattung W und Z, andererseits genetisch männliche Weibchen mit zwei gleichen Geschlechtschromosomen (zweimal Z). Diese verkehrten ZZ-Weibchen produzieren als Nachkommen zwangsläufig fast nur ZZ-Weibchen. (Normale Töchter des Typs WZ können sie nicht haben, weil beide Eltern nur Z-Chromosomen liefern. Und da ZZ-Töchter immer infiziert sind und damit fast alle ihre Eier auch, werden praktisch sämtliche ihrer Nachkommen Weibchen.)

Diese beiden Weibchensorten, die infizierten „richtigen" und die „verkehrten", erzeugen folglich im Verhältnis deutlich mehr Töchter als nicht infizierte Weibchen. Mit jeder Generation sinkt in der Population der Anteil normaler WZ-Weibchen, bis diese so gut wie verschwunden sind. Praktisch alle Tiere besitzen schließlich zwei Z-Chromosomen. Von jetzt an bestimmen allein die Parasiten das Geschlecht ihrer Wirte. Wer damit infiziert ist, wird zum Weibchen, wer sie nicht beherbergt, entwickelt sich zum Männchen. Allerdings scheinen die Rollasseln mancherorts die Kontrolle über das Geschlechterverhältnis zurückerrungen zu haben. Auf noch nicht verstandene Weise bestimmen diese Gruppen offenbar selbst den Anteil infizierter Tiere.

Am häufigsten beeinflussen die Wolbachia-Bakterien die Fortpflanzung ihrer Wirte, indem sie von vornherein die Entwicklung der Keime unterbinden. Bei dieser Strategie bekommen nicht-infizierte Weibchen, die sich mit infizierten Männchen paaren, keinen Nachwuchs. Der Grund ist eine Unverträglichkeit der Keimzellen (eine so genannte cytoplasmatische Imkompatibilität). Die Spermien infizierter Männchen haben sich der Bakterien zwar entledigt, enthalten aber noch ein bakterielles Gift, das die Entwicklung des Embryos unmöglich macht (siehe Kasten auf Seite 58). Die Eizellen infizierter Weibchen können sich dieses Giftes erwehren, sodass Paarungen zwischen zwei Parasiten tragenden Partnern Erfolg haben. Infizierte Weibchen können sich auch ohne weiteres mit parasitenfreien Männchen einlassen.

Den Vorteil dieses Tricks für den Schmarotzer kann man ausrechnen: Die infizierten Weibchen der Wirtspopulation erhalten die größeren Fortpflanzungschancen, denn sie können sich mit jedem Männchen erfolgreich paaren. Bei den anderen geht die Sache mitunter schief.

Was bedeutet das für die weitere Evolution der Wirtsart? Die wahlweise Unverträglichkeit von Spermium und Eizelle schränkt den Genfluss zwischen Teilen einer Population ein. Im beschriebenen Fall können infizierte und nicht infizierte Tiere sich teilweise noch miteinander vermehren. Doch es gibt auch den bemerkenswerten Fall totaler Unverträglichkeit in beiden Richtungen (eine so genannte bidirektionale cytoplasmatische Inkompatibilität). Dabei treffen bei der Befruchtung zwei unvereinbare Bakterienstämme aufeinander. Tiere, die den jeweils anderen Stamm tragen, können ▶

Literaturhinweise

Wolbachia-*Induced Incompatibility Precedes Other Hybrid Incompatibilities in* Nasonia. *Von S. R. Bordenstein et al. in: Nature, Bd. 409, Heft 6821, 8. 2. 2001, S. 707.*

Sexual Selection in an Isopod with Wolbachia-*Induced Sex Reversal: Males Prefer Real Females. Von J. Moreau et al. in: Journal of Evolutionary Biology, Bd. 14, Heft 3, 05/2001, S. 388.*

Weblinks zum Thema bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis"*



Parasitische Wespen der Gattung *Nasonia* bilden womöglich manchmal deswegen getrennte Arten, weil ihr Wolbachia-Untermieter sie auseinander trieb.

miteinander keinen Nachwuchs bekommen. Die Unverträglichkeit der Keimzellen kann eine Population in zwei getrennte Lager spalten.

Biologen diskutieren schon länger, ob die Wolbachia-Parasiten mitunter eine Aufspaltung der Wirte in neue Arten vorantreiben. Denn wenn zwischen Populationen kein Genfluss mehr stattfindet, können sich aus ihnen leicht neue Arten entwickeln. Nach der klassischen Vorstellung können neue räumliche Barrieren Populationen auf immer trennen – sei es, dass sich inmitten des Verbreitungsgebietes eine Gebirgskette bildet oder dass ein Anstieg des Meeresspiegels Inseln zurücklässt, deren Bewohner nun ihren Artgenossen nicht mehr begegnen und sich darum fortan eigenständig weiterentwickeln. Mit der Zeit gehen die Teilgruppen so verschiedene Wege, dass sie genetisch nicht mehr zusammenpassen. Schließlich sind sie entweder überhaupt nicht mehr kreuzbar, oder sie erzeugen nicht lebensfähige oder zumindest sterile Nachkommen.

Kann auch der Befall mit Wolbachia-Bakterien Populationen aufspalten? Seit Biologen die cytoplasmatische Unverträglichkeit entdeckt haben, fragen sie sich, ob dieser Mechanismus als Barriere genügt, damit neue Arten entstehen.

Ob infektionsbedingte Artbildung vorkommt, ist schwierig zu beantworten, schon weil ein Forscherleben viel zu kurz ist, um verfolgen zu können, wie aus einer Art zwei neue werden. Allerdings kann man nach Wirtsarten des Bakteriums Wolbachia suchen, die sich wegen des Schmarotzers auf Grund gegenseitiger cytoplasmatischer Unverträglichkeit nicht kreuzen können, die aber offensichtlich erst dabei sind, sich auseinander zu entwickeln.

Diese Kriterien erfüllen zwei einander sehr ähnliche parasitische Wespenarten der Gattung *Nasonia* aus dem Osten Nordamerikas, die ihre Eier in Fliegenpuppen ablegen. Die Wespen *Nasonia vitripennis* und *Nasonia giraulti* erscheinen als getrennte Arten, die sich normalerweise nicht erfolgreich kreuzen lassen. Jede trägt einen anderen Stamm der Parasiten, was wechselseitige Unverträglichkeit bewirkt.

Macht eines Parasiten

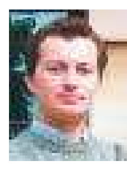
Doch als Johannes A. J. Breeuwer von der Universität Amsterdam und Werren die Wespen mit Antibiotika behandelten, erzeugten diese mit der jeweils anderen Art lebensfähige Nachkommen, die sich sogar untereinander fortpflanzen konnten. Allerdings tauchten in der zweiten Hybridgeneration ernste Entwicklungsprobleme auf. Möglicherweise ist das Erbgut der beiden Wespenarten schon so verschieden geworden, dass eine Vermischung nicht mehr gelingen würde. Ob die Bakterien die Auseinanderentwicklung mit vorantrieben, ist jedoch noch nicht bewiesen.

Die genetische Nähe zwischen der Wespenart *N. giraulti* und einer weiteren Art, *N. longicornis*, scheint noch enger zu sein. Das wiesen Werren, Seth Bordenstein und Patrick O'Hara von der Universität Rochester nach. Zwar gelten beide Wespen taxonomisch als unterschiedliche Arten, die unter anderem verschiedene Wirtsgruppen befallen. Wiederum sorgt der Zellbewohner Wolbachia für eine gegenseitige cytoplasmatische Unverträglichkeit, die verschwindet, wenn man die Bakterien mit Antibiotika abtötet. Aber diese Hybriden bleiben auch in den nachfolgenden Generationen lebensfähig. Offenbar haben sich die beiden Wespenarten genetisch noch kaum auseinander entwickelt. Dafür erscheint der Parasit hier als vielleicht wesentliche Triebkraft der Evolution zweier neuer Arten.

Manchmal könnten die Wolbachia-Bakterien zur Artbildung beitragen, ohne aber dafür die Hauptursache zu sein. Solch einen Fall beschreibt eine Forschergruppe, der unter anderem D. DeWayne Shoemaker von der Western Michigan Universität, Vaishali Katju von der Indiana University und John Jaenike von der Universität Rochester angehörten. Die Studie galt zwei Arten von Taufliegen (auch Essig- oder Obstfliegen genannt): *Drosophila recens* und *Drosophila subquinaria*. Erstere trägt einen Wolbachia-Stamm, der Nachkommen von deren Männchen mit Weibchen der zweiten Art verhindert. Die zweite Art ist nicht infiziert, sodass ein eingeschränkter Genfluss zwischen beiden Arten immer noch möglich wäre. Aber anders als die *D.-subquinaria*-Weibchen sind die *D.-recens*-Weibchen bei der Partnerwahl so heikel, dass sie sich kaum je mit einem *D.-subquinaria*-Männchen einlassen. Im Verein halten die beiden Selektionsmechanismen die beiden Arten auseinander.

Solche Beispiele dürfen nicht zu voreiligen Schlüssen verführen, denn noch ist unbewiesen, ob die Mikrobe tatsächlich artbildend wirken kann. Andererseits fällt auf, dass der Parasit besonders oft in Insekten und Milben lebt, den artenreichsten Tiergruppen überhaupt. Vielleicht hat er wirklich am Baum des Lebens dort neue Triebe genährt, wo dieser Baum buschig ausschlägt.

Obwohl der Mikroorganismus Wolbachia sehr weit verbreitet ist und viel Einfluss hat – bis hin zu menschlichen Krankheiten –, birgt er noch immer viele Rätsel. Der Parasit dürfte noch manche Überraschung bereithalten. Dies könnte nicht zuletzt der Tropenmedizin nützen. ■



Laurence D. Hurst *(oben) und* ***James P. Randerson*** *erforschen an der Universität von Bath in England das parasitische Bakterium Wolbachia. Hurst ist Professor für Evolutionsgenetik in Bath. Randerson befasste sich im Rahmen seiner Doktorarbeit mit den evolutionären Folgen egoistischer Organellen und Symbionten und schreibt heute für die Zeitschrift „New Scientist".*



Neues Messverfahren für die Durchblutung

Der Vasograph ist ein neuartiges Gerät zur peripheren Durchblutungsregistrierung auf kalorimetrischer Grundlage; dadurch wird eine exakte, fortlaufende Registrierung des Wärmestromes über einer definierten Hautfläche an jeder Körperstelle ermöglicht. Das Verfahren beruht auf dem Prinzip des Strömungskalorimeters. ... Die Meßgenauigkeit beträgt bei mittlerer Kalorienabgabe der Haut +/– 0,0002 cal/sec cm^3, Einstellzeit etwa 5 sec. *(Die Umschau, 52. Jg., Heft 19, S. 604, 1952)*



Selbst wenige inhalierte Zigarettenzüge, die eine Verengung der Kapillaren bewirken, werden vom Vasographen angezeigt.

Vinylharz-Schaumstoff

Die amerikanische Elastomer-Chemical Corporation entwickelte ein Verfahren, das es ermöglicht, aus Vinylkunstharzen einen Schaumstoff herzustellen. ... Das flüssige Harz wird in Druckzylindern durch Einpressen von Luft zum Schäumen gebracht. Der flüssige Schaum wird dann in Formen gegossen und bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen im Trockenofen vulkanisiert. Das so erhaltene Material läßt sich in den verschiedensten Farbtönen herstellen, ist zerreißfest und alterungsbeständig und mechanisch leicht zu bearbeiten. Es kann in den unterschiedlichsten Formen hergestellt werden und eignet sich unter anderem auch zur Möbelpolsterung. *(Chemiker-Zeitung, 76. Jg., Nr. 24, S. 691, 1952)*

Blattgrün gegen Körpergeruch?

Seit einiger Zeit wird ... für Seifen geworben, welche dank ihres Chlorophyllgehaltes angeblich jeden Körpergeruch schnell und vollkommen zu beseitigen vermögen. ... Der berühmte Chemiker R. Willstätter fand schon vor Jahren bei seinen Arbeiten über das Chlorophyll, daß daraus bei hydrolytischer Spaltung mittels Alkalien stabile Körper entstehen. Diese sogenannten Chlorophylline kommen hier als wirksames Prinzip bei Verabfolgung durch den Mund in Betracht. ... Bei Anwendung in Seifenform könnte das Chlorophyll unmittelbar lokal wirken, etwa indem es die Zersetzung von Schweiß usw. hemmt. *(Naturwissenschaftliche Rundschau, 5. Jg., Heft 10, S. 425, 1952)*



Erkennung des Scheintodes

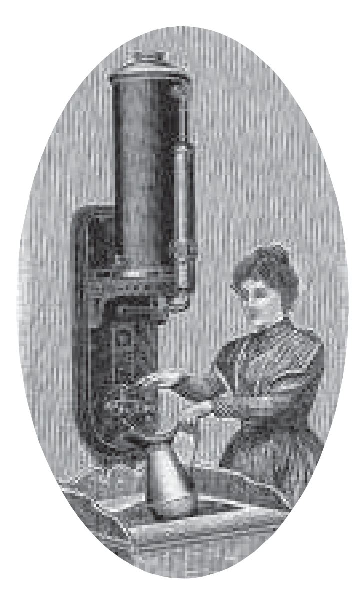
Obwohl es kaum vorkommen dürfte, daß nach den heutigen Untersuchungsmethoden ein Scheintodter lebendig begraben wird, muß natürlicher Weise schon mit Rücksicht auf die Besorgnis des Laienpublicums jedes Mittel willkommen sein, das den Scheintod sicher erkennen läßt. Wird nach Icard in Marseille eine Lösung von Fluorescin unter die Haut gespritzt, so zeigen sich beim lebenden Menschen schon nach einigen Minuten Färbungen im Gewebe des Auges, weil das stark färbende Mittel in den Kreislauf des Blutes übergegangen, also noch Säftestrom vorhanden ist. Ein Blutstropfen erzeugt in einem Glase Wasser grasgrüne Färbung. Anders, wenn der Tod schon eingetreten ist, dann stockt der Säftestrom sofort und bloß die der Einspritzungsstelle nächstliegenden Gewebe färben sich. *(Neueste Erfindungen und Erfahrungen, XXIX. Jg., S. 285, 1902)*

Neuartige Warmwasserquelle

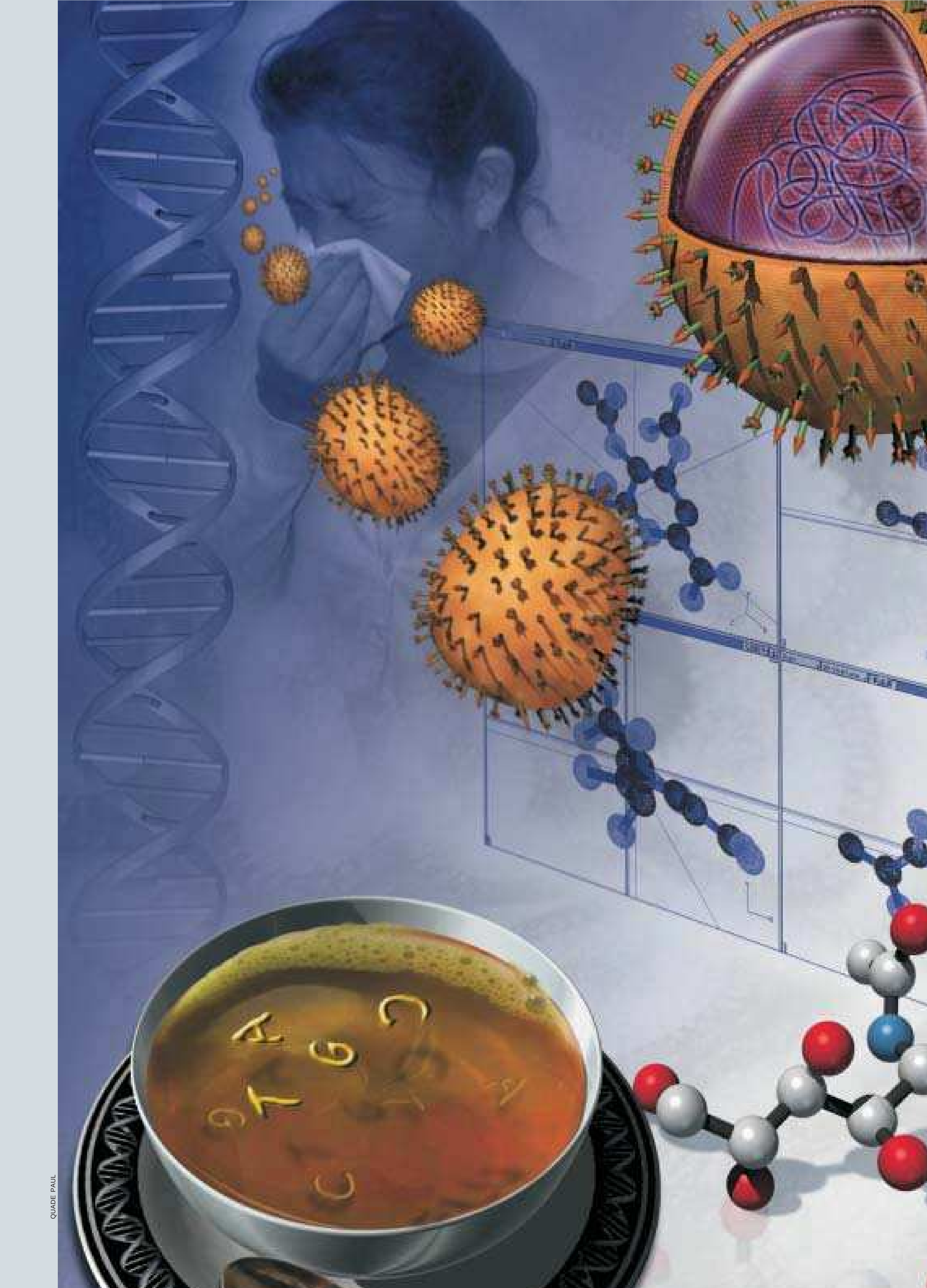
Wie angenehm und praktisch ist es, jederzeit warmes Wasser, besonders im Haushalt, zur Hand zu haben. ... Der Hauptvorzug dieser Warmwasserquelle besteht darin, dass die Funktion ganz auf automatischem Wege erfolgt. Zur Inbetriebsetzung wird nur der mit „Warm“ bezeichnete Wasserhahn geöffnet und sofort entzündet sich der Gasbrenner selbstthätig an einer Zündflamme. Die Zündung ist eine absolut sichere und kann nur dann erfolgen, wenn wirklich Wasser den Apparat durchströmt, indem bei plötzlich eintretendem Wassermangel der Automat den Gaszufluss absperrt und so den Gasbrenner erlöschen lässt, mithin ein Zerstören des Ofens nicht eintreten kann. *(Die Umschau, VI. Jg., No. 41, S. 819, 1902)*

Verwendung des Telefons in der Chirurgie

Es wird von amerikanischen Aerzten dazu benutzt, im menschlichen Körper befindliche Metallstücke (Bleikugeln, Nadeln, Metallsplitter etc.) aufzufinden. ... Zu dem Zweck wird eine Metallplatte benutzt, die mit einem salzlösunggetränkten Blatt Filtrierpapier bedeckt ist. Die Platte wird mit dem Telephon leitend verbunden, ... auf die Haut aufgelegt und nunmehr die Sonde, die ebenfalls mit dem Telephon verbunden ist, in den Körper eingeführt; sobald diese das Metallstück im Patienten trifft, hört man im Telephon ein verstärktes Geräusch. *(Naturwissenschaftliche Wochenschrift, II. Bd., Nr. 4, S. 41/42, 1902)*



Vaillants Warmwasserquelle „Automat“, die nur zündet, wenn Wasser den Apparat durchströmt



QUADE PAUL



PHARMAFORSCHUNG

Neue Waffen gegen Viren

Das Zeitalter der Virenbekämpfung ist angebrochen. Zahlreiche antivirale Medikamente sind schon auf dem Markt oder in der Entwicklung. Hinter den Erfolgen stecken vor allem Fortschritte in der Genomik: der Entzifferung und vergleichenden Analyse des Erbguts dieser tückischen Erreger.

Von William A. Haseltine

Mitte der 1980er Jahre, als sich herausstellte, dass die schreckliche neue Krankheit Aids von einem Virus namens HIV verursacht wird, standen die Regale der Apotheken voller Medikamente gegen bakterielle Infektionen. Gegen Viruserkrankungen aber hatte die Medizin kaum mehr zu bieten als Kräutertees und eine Reihe von Impfstoffen. Inzwischen hat sich die Situation grundlegend geändert. Heute gibt es Dutzende von virushemmenden Substanzen sowie mehrere neue Vakzinen; einige hundert weitere Wirkstoffe befinden sich in der Entwicklung. Waren die 1950er Jahre das goldene Zeitalter der Antibiotika, so stehen wir heute an der Schwelle zu einem goldenen Zeitalter der antiviralen Medikamente.

Dieser Fortschritt speist sich aus mehreren Quellen. Pharmaunternehmen verweisen darauf, dass sie in den letzten 15 Jahren neue, raffinierte Verfahren zur Suche nach Wirkstoffen aller Art entwickelt haben. Gleichzeitig eröffneten die verzweifelten Bemühungen um lebensrettende Therapien für HIV-Infizierte und Aids-Kranke kreative neue Wege nicht nur zur Bekämpfung der Immunschwäche, sondern auch für den Kampf gegen andere Viren.

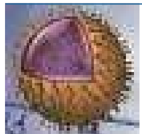
Noch größere Schützenhilfe aber kam von einer wenig beachteten Seite: der Virus-Genomik. Sie liefert die Reihenfolge der „Buchstaben“ im genetischen „Konstruktionshandbuch“ (die Sequenz der Nucleotide in der Nucleinsäure) des Krankheitserregers. Dieser Text umfasst die Baupläne für sämtliche Proteine, die als Strukturelemente oder Funktionsträger des Virus dienen und so sein Verhalten bestimmen. Wer diese Erbinformation ganz oder auch nur teilweise entziffert hat, kann daraus schnell eine Menge darüber ablesen, wie das Virus sich vermehrt und seine krank machende Wirkung entfaltet. Damit erfährt er auch, wo die Achillesfersen des Übeltäters sind. Heute kann man das vollständige Genom jedes Virus innerhalb weniger Tage sequenzieren und so die Schwachpunkte des Erregers mit nie da gewesener Geschwindigkeit aufspüren.

Die meisten antiviralen Medikamente, die inzwischen in Apotheken zu haben sind, richten sich gegen HIV, Herpesviren (Auslöser von Lippenbläschen, aber auch von lebensbedrohenden Krankheiten wie Gehirnentzündung) sowie die Hepatitis-B- und -C-Viren (beide verursachen Leberentzündungen, die zu Leberkrebs führen können). HIV und die Erreger dieser ▶

Kräutertees und andere traditionelle Hausmittel gegen Erkältungskrankheiten lindern bestenfalls die Symptome. Erkenntnisse über die genetische Ausstattung der Viren (hier symbolisiert durch die Buchstaben A, C, G und T des genetischen Alphabets) liefern heute hochwirksame Alternativen.

beiden Arten von infektiöser Gelbsucht werden sicher noch für einige Zeit im Mittelpunkt der Forschungsbemühungen stehen; schließlich sind sie für über 250 000 Krankheitsfälle jährlich allein in den Vereinigten Staaten und für mehrere Millionen weltweit verantwortlich. Aber auch vielen anderen Viruserkrankungen haben Biologen, Mediziner und Pharmazeuten den Kampf angesagt.

Ich kann hier nicht alle Gruppen virushemmender Wirkstoffe beschreiben, die bereits auf dem Markt sind oder erprobt werden, aber ich möchte einen Eindruck von den enormen Fortschritten in den letzten Jahren vermitteln, die wir der Genomik und anderen raffinierten Untersuchungsverfahren verdanken.



In der Erbinformation eines Virus verbergen sich Hinweise auf mögliche Angriffspunkte

Die ersten virushemmenden Substanzen (die sich vor allem gegen Herpes richteten) wurden in den 1960er Jahren eingeführt und waren die Früchte konventioneller Methoden der Wirkstoffsuche. Viren sind sehr einfach aufgebaut: Sie bestehen im Wesentlichen aus Genen und manchmal ein paar Enzymen (biologischen Katalysatoren), die in einer Proteinkapsel und teilweise zusätzlich in einer Hülle aus Lipiden (Fettstoffen) stecken. Wegen ihrer mehr als kargen Ausstattung können sie sich nur im Inneren lebender Zellen vermehren. Um Wirkstoffe gegen Viren zu finden, infizierte man deshalb Zellen, ließ sie in Gewebekulturen wachsen und behandelte sie dann mit chemischen Verbindungen, die als Hemmstoffe für damals bekannte virale Aktivitäten in Frage kamen. Ließ eine derartige Substanz die Virusmenge in der Kultur absinken, wurde sie eingehender unter die Lupe genommen.

Damit waren solche Reihenuntersuchungen im Grunde nur eine Art besseren Herumprobierens. Außerdem lieferten sie kaum Anhaltspunkte, welche anderen viralen Aktivitäten sich für einen Angriff anboten. Das schränkte die Möglichkeiten ein, wirksamere Medikamente oder solche mit weniger Nebenwirkungen zu entwickeln.

Die Genomik wurde zum Sprungbrett für die Entdeckung neuer Angriffsziele. Damit bahnte sie den Weg zur Entwicklung ganzer Klassen von neuartigen virushemmenden Medikamenten. Die meisten Zielstrukturen, für die Biologen sich seit gut zwanzig Jahren interessieren, haben sie mit Hilfe der Genomik aufgespürt, obwohl der Begriff selbst erst Ende der 1980er Jahre geprägt wurde, als es schon einige der heutigen antiviralen Medikamente gab.

IN KÜRZE

➤ Viren sind in fast allen Stadien ihres komplizierten Vermehrungszyklus mit pharmazeutischen Wirkstoffen angreifbar.

➤ Wenn das Erbgut eines Virus entziffert ist, lässt es sich per Computer mit demjenigen anderer Viren vergleichen. Durch solche Vergleiche gelingt es, Gene in dem fraglichen Virus aufzuspüren, deren Proteinprodukte sich als Angriffspunkte für Arzneimittel eignen.

➤ Auf diese Weise ist es inzwischen gelungen, Medikamente gegen Krankheiten wie Aids, Hepatitis und Influenza zu entwickeln.

Strategien der Wirkstoffsuche

Sobald die Abfolge der Nucleotide eines Virus ermittelt ist, lässt sie sich per Computer mit bereits bekannten Sequenzen anderer Lebewesen und Viren vergleichen. Übereinstimmungen liefern Anhaltspunkte, welche Eiweißstoffe in der viralen Erbsubstanz verschlüsselt sind. Buchstabenfolgen, die bereits analysierten Genen anderer Organismen stark ähneln, enthalten wahrscheinlich auch beim Virus die Bauanleitung für Proteine mit verwandter Struktur und Funktion. Anhand dieser Informationen kann man ein umfassendes Bild von den molekularen Abläufen zeichnen, mit denen der Erreger im Körper Fuß fasst und sich vermehrt.

Dieses Bild wiederum lässt erkennen, welche Proteine – oder welche Molekülteile darin – man am sinnvollsten außer Gefecht setzen sollte. Höchste Priorität genießen natürlich jene Angriffspunkte, deren Zerstörung die Virusaktivität am stärksten beeinträchtigt. Sie sollten zugleich in allen wichtigen Stämmen des Virus weitgehend identisch sein, damit das Medikament gegen ein möglichst breites Spektrum von Virusvarianten wirkt. Zudem sind Proteindomänen vorzuziehen, die nur wenig Ähnlichkeit mit Molekülteilen aus dem menschlichen Organismus haben – eine Vorsichtsmaßnahme, um die Schädigung gesunder Zellen und daraus resultierende unerwünschte Nebenwirkungen zu vermeiden.

Nachdem das Angriffsobjekt identifiziert ist, beginnt die Suche nach Substanzen, die seine Funktion beeinträchtigen. Bei dieser Detektivarbeit leisten die in den 1970er Jahren eingeführten Standardverfahren der Gentechnik gute Dienste: Man lässt das anvisierte Protein oder den ausgewählten Teil daraus von Bakterien, in die das zugehörige Gen eingeschleust wurde, in großen Mengen erzeugen. Das Produkt dient dann als Sonde für einen Schnelltest: Nur Substanzen, die sich daran binden, können die Funktion des Eiweißstoffes stören und verdienen es, weiter untersucht zu werden.

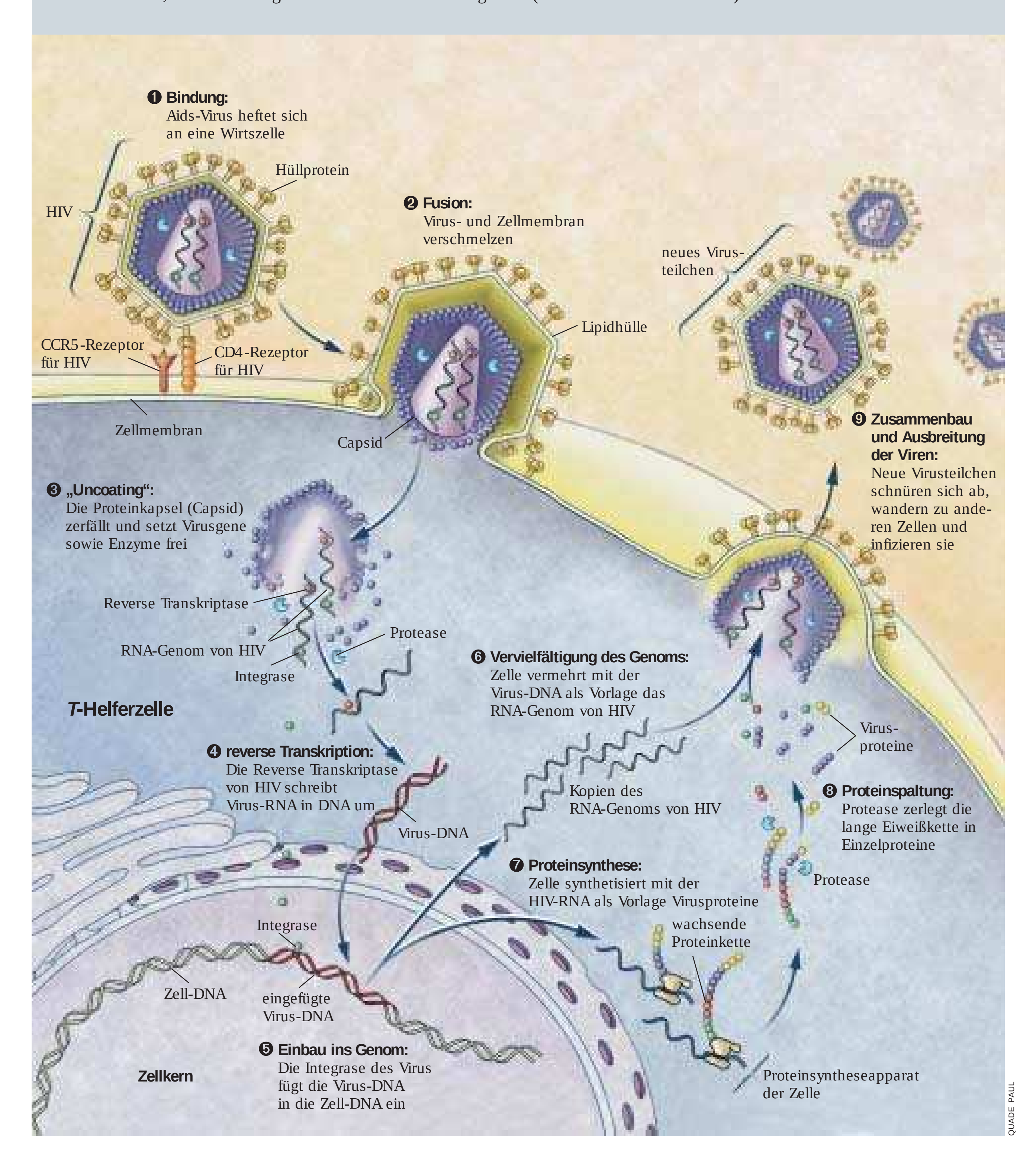
Ein alternatives Verfahren besteht darin, die dreidimensionale Struktur einer Proteindomäne zu analysieren und anschließend Wirkstoffmoleküle zu entwerfen, die sich eng an diesen Bereich schmiegen. Auf diese Weise lässt sich beispielsweise eine Verbindung konstruieren, die sich an das aktive Zentrum eines für die Virusvermehrung notwendigen Enzyms heftet und es dadurch blockiert. Natürlich besteht auch die Möglichkeit, die alten Suchverfahren mit den modernen, strukturgestützten Methoden zu kombinieren.

Die neuesten Strategien zur Medikamentenentwicklung zielen darauf ab, Viren in allen Stadien ihres Lebenszyklus gleichzeitig anzugreifen. Die diversen Virustypen unterscheiden sich zwar in den Feinheiten ihrer Vermehrungsmechanismen, folgen aber meist einem einheitlichen Grundschema (siehe Kasten auf der rechten Seite). Zunächst heftet sich der Erreger an die Wirtszelle und befördert sein Erbgut ins Zellinnere. Dort lässt er es vervielfältigen und vom zelleigenen Proteinsyntheseapparat die zugehörigen Eiweißstoffe herstellen. Schließlich werden die verschiedenen Bausteine zu einem Schwarm neuer Viruspartikel zusammengefügt und freigesetzt. Die frisch produzierten Erreger können dann in anderen Zellen einen neuen Infektionszyklus beginnen.

Im Idealfall lauert man dem Virus im Frühstadium der Infektion auf, wenn es noch keine Zeit hatte, sich im Organismus auszubreiten und Symptome zu verursachen. Hier liegt die besondere Stärke der Impfstoffe: Sie bereiten das Immunsystem darauf vor, einen bestimmten Krankheitserreger praktisch sofort nach seinem Eindringen in den Organismus gezielt zu zerstören. Traditionell dienten dazu abgetötete oder abgeschwächte Formen des Keims, die sich – zumindest theoretisch – nicht mehr vermehren und deshalb auch keine Symptome verursachen ▶

Ein Virus in Aktion

Der Vermehrungszyklus des Aids-Erregers HIV (Human-Immunschwäche-Virus) ist ungewöhnlich kompliziert, umfasst aber die allen Viren gemeinsamen grundlegenden Schritte. Als Erstes heftet sich das infektiöse Teilchen an seine Wirtszelle und schleust seine Gene in ihr Inneres ein. Dann vereinnahmt es dort den biochemischen Apparat und die Rohstoffe, um seine eigenen Gene zu vervielfältigen und die benötigten Proteine herstellen zu lassen. Die so entstandenen Moleküle werden schließlich zu neuen Virusteilchen zusammengesetzt, die aus der Zelle entweichen, sich ausbreiten und wiederum andere Zellen infizieren können. Sämtliche Viruskomponenten, die an diesen Schritten mitwirken, eignen sich als Angriffspunkte für Medikamente (siehe Tabelle auf Seite 67).



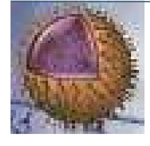
können. Doch manchmal erwiesen sie sich als unerwartet virulent. Inzwischen gibt es weniger riskante Alternativen. Am gebräuchlichsten sind so genannte Untereinheiten-Impfstoffe, die nur Bruchstücke eines Krankheitserregers enthalten. Solche Fragmente können niemals eine Infektion hervorrufen, sorgen aber, richtig ausgewählt, dennoch für eine schützende Immunantwort.

Einer der ersten Untereinheiten-Impfstoffe richtete sich gegen Hepatitis B. Zu seiner Herstellung dienten Viren aus dem Blutplasma infizierter Personen, aus denen bestimmte virale Proteine isoliert wurden. Inzwischen lässt sich der Impfstoff viel eleganter auf gentechnischem Weg gewinnen: Man schleust ein virales Gen in ein Bakterium ein, das dann den zugehörigen Eiweißstoff in reiner Form produziert. Derzeit werden auf Grundlage der Genomik weitere Vakzinen gegen gefährliche Viruskrankheiten entwickelt – darunter Denguefieber, Genitalherpes und das vom Ebola-Virus ausgelöste, oft tödliche hämorrhagische Fieber.

Außerdem befinden sich mehrere Impfstoffe zur Behandlung und Vorbeugung einer HIV-Infektion in der Erprobruch ab. Eine große Gruppe von Wirkstoffen hemmt die Virusaktivität, indem sie den Erreger daran hindert, in Zellen seines bevorzugten Typs einzudringen.

Dieses Eindringen spielt sich in mehreren Schritten ab. Es beginnt damit, dass sich das Virus an eine Andockstelle – den Rezeptor – auf der Oberfläche der Wirtszelle anlagert. Am Ende steht das „Uncoating“, die Freisetzung der Virusgene aus der Proteinkapsel im Inneren der Zelle. Bei Viren mit Lipidhülle ist ein weiterer Schritt dazwischengeschaltet: Bevor sich ihre Nucleinsäure aus der Proteinkapsel befreien kann, muss die Hülle mit der Zellmembran oder der Membran eines zellinternen Bläschens verschmelzen, wobei das eigentliche Virus ins Zellinnere geschleust wird.

Derzeit befinden sich mehrere Wirkstoffe in der Entwicklung, die HIV daran hindern sollen, in Helfer-*T*-Lymphocyten einzudringen – jene Gruppe weißer Blutzellen, in denen sich der Aids-Erreger üblicherweise vermehrt. Sie tragen Moleküle namens CD4 und CCR5 auf ihrer Oberfläche, die HIV als Eintrittspforten benutzt. Durch Blockierung von CD4 ließ sich das Eindringen des Virus in die



Neuartige Wirkstoffe blockieren den Zugang des Virus zu seiner Wirtszelle

bung. Aber die Gene des Aids-Erregers mutieren schnell, sodass immerzu neue Virusstämme entstehen. Ein Impfstoff, der gegen bestimmte Varianten eine Immunreaktion auslöst, ist deshalb gegen andere unter Umständen unwirksam. Durch Vergleich der Genome verschiedener Virusstämme kann man aber feststellen, welche Abschnitte in den meisten von ihnen vorkommen, und anhand dieser Abschnitte reine Fragmente von Virusproteinen produzieren (Spektrum der Wissenschaft 7/2002, S. 100). In Tests lässt sich dann prüfen, ob sie gegen die meisten weltweit vorkommenden Virusstämme schützen. Alternativ kann es sinnvoll sein, sich auf maßgeschneiderte Impfstoffe gegen die in bestimmten Regionen vorherrschenden HIV-Varianten zu konzentrieren.

Türwächter

Wenn Impfstoffe nicht zur Verfügung stehen oder nicht sonderlich gut wirken, rücken Therapieverfahren in den Vordergrund. In seltenen Fällen lassen sich damit Viruserkrankungen heilen, aber meist lindert die Behandlung bisher nur die Symptome oder kürzt einen akuten Aus-

Lymphocyten zwar nicht verhindern, aber mit dem Versperren von CCR5 könnte die Blockade gelingen.

Auch Amantidin und Rimantidin – die ersten beiden neuen Medikamente (von insgesamt vier) gegen das Influenza-Virus – blockieren den Zutritt zur Wirtszelle, allerdings auf andere Weise. Auf die beiden Wirkstoffe stießen Pharmahersteller, als sie ausgewählte Verbindungen nach ihrer allgemeinen Hemmwirkung auf die Virusvermehrung durchmusterten. Die genauere Untersuchung erwies, dass die Verbindungen gezielt die Verschmelzung der Lipidhülle von Grippeviren mit der Membran der Wirtszelle und die Freisetzung der Nucleinsäure behindern. Mit Hilfe der Genomik wurden inzwischen weitere solche Fusionshemmer entdeckt. Sie könnten zur Bekämpfung der Hepatitis B und C, des HIV sowie des respiratorisch-syncytialen Virus (RSV) dienen, das bei frühgeborenen Säuglingen Lungenentzündungen hervorrufen kann.

Gegen gewöhnliche Erkältungskrankheiten wirkt Pleconaril, das Viren ebenfalls am Eindringen in die Zelle hindert. Genom- und Strukturvergleiche haben gezeigt, dass die meisten Rhinoviren (die Hauptverursacher grippaler Infekte) eine charakteristische Vertiefung an der Oberfläche aufweisen. Pleconaril heftet sich derart an diese Tasche, dass das Virus seine Proteinhülle nicht mehr abstreifen kann. Anscheinend wirkt es auch gegen Enteroviren, die Durchfall sowie Entzündungen der Gehirnhaut, des Gehirns selbst und der Bindehaut verursachen können. Die Zulassung gegen Schnupfen wurde in den USA allerdings verweigert, weil der begrenzte Nutzen des Mittels gegen harmlose Infekte mögliche Nebenwirkungen nicht klar überwiegt.

Kopierschutz

Mehrere antivirale Wirkstoffe, die schon auf dem Markt oder in Erprobung sind, greifen erst ein, nachdem das aus DNA oder RNA bestehende Virusgenom den Proteinmantel abgestreift hat und bereit ist, sich zu vervielfältigen und die Produktion von Virusproteinen in Gang zu setzen. Zu diesen Medikamenten zählen so genannte Nucleosid- oder Nucleotid-Analoga, die den Bausteinen der Gene ähneln. Zelleigene Enzyme, die für das Kopieren der Virus-DNA oder -RNA sorgen, fügen die falschen Bausteine in die entstehenden Stränge ein. Dort verhindern die Imitate dann, dass weitere Nucleotide angefügt werden. Auf diese Weise bringen sie die Virusvermehrung sehr wirksam zum Stillstand.

Ein solches Nucleosid-Analogon ist Aciclovir: der erste potente antivirale Wirkstoff, der sich zugleich als relativ ungiftig erwies. Er wurde bei der Suche nach Verbindungen entdeckt, welche die Vermehrung des *Herpes-simplex*-Virus hemmen. Aciclovir wird vor allem bei Genitalherpes verschrieben, aber chemisch sehr ähnliche Wirkstoffe helfen auch bei anderen Herpes-Infektionen, so bei der von *Varicella zoster* ausgelösten Gürtelrose und einer Netzhautentzündung, die das Cytomegalievirus verursacht.

Auch Zidovudin (AZT), das erste für die Aids-Behandlung zugelassene Medikament, ist ein Nucleosid-Analogon (siehe „Aids-Therapien“, Spektrum der Wissenschaft, 12/1988, S. 120). Es wurde ursprünglich zur Krebstherapie entwickelt. Aber schon bald stellte sich heraus, dass es die Tätigkeit der Reversen Transkriptase stört, eines Enzyms, mit dem HIV sein RNA-Genom in DNA umschreibt. Gelingt dieser Kopiervorgang, bauen andere HIV-Enzyme die DNA in die Chromosomen der befallenen Zelle ein. Von dort steuert das fremde Erbgut dann die Virusvermehrung.

AZT verursacht bei vielen Patienten schwere Nebenwirkungen wie Blutarmut

Antivirale Medikamente

Viele antivirale Präparate sind bereits auf dem Markt; eine Auswahl davon ist hier aufgelistet. Etwa dreißig weitere Wirkstoffe, die aus der Erforschung von Virus-Genomen hervorgegangen sind, werden zurzeit am Menschen getestet.

Wirkstoffname	Wirkungsmechanismus	Wichtigste Viruserkrankungen
Hemmung der Genomvermehrung		
Abacavir, Didanosin, Stavudin,Zalcitabin, Zidovudin	Nucleosid-Analoga; hemmen die Reverse Transkriptase	HIV-Infektion
Aciclovir, Ganciclovir, Penciclovir	Nucleosid-Analoga; hemmen das Enzym, das die Virus-DNA verdoppelt	Herpesinfektionen; vom Cytomegalievirus verursachte Netzhautentzündung
Cidofovir	Nucleotid-Analogon; hemmt das Enzym, das die Virus-DNA verdoppelt	vom Cytomegalievirus verursachte Netzhautentzündung
Delavirdin, Efavirenz	nicht-nucleosidische oder -nucleotidische Hemmstoffe der Reversen Transkriptase	HIV-Infektion
Lamivudin	Nucleosid-Analogon; hemmt die Reverse Transkriptase	HIV- und Hepatitis-B-Infektionen
Ribavirin	synthetisches Nucleosid; verursacht Mutationen in Virusgenen	Hepatitis-C-Infektion
Hemmung der Proteinsynthese		
Amprenavir, Indinavir, Lopinavir, Nelfinavir, Ritonavir, Saquinavir	HIV-Proteasehemmer	HIV-Infektion
Fomivirsen	Anti-Sense-Molekül; blockiert die Translation der Virus-RNA	vom Cytomegalievirus verursachte Netzhautentzündung
Alpha-Interferon	aktiviert die zellinterne Immunabwehr, die dann die Synthese der Virusproteine blockiert	Hepatitis B- und C-Infektionen
Blockade der Virusausbreitung von Zelle zu Zelle		
Oseltamivir, Zanamivir	Hemmung der Virusfreisetzung	Influenza
Palivizumab	Humanisierter monoklonaler Antikörper markiert Viren für die Zerstörung	Infektionen mit dem respiratorisch-syncytialen Virus

(Anämie). Untersuchungen der Reversen Transkriptase, die sich auf neue Erkenntnisse über die Sequenz des betreffenden Gens stützten, ermöglichten inzwischen die Entwicklung weniger toxischer Nucleosid-Analoga. Zu ihnen gehört Lamivudin, das auch gegen Hepatitis B wirkt. Der Erreger dieses Typs der Gelbsucht schreibt RNA-Kopien seines DNA-Genoms mit Hilfe der Reversen Transkriptase wieder in DNA um. Diesen Vorgang blockiert Lamivudin. Durch eingehende Analysen der Reversen Transkriptase von HIV ließ sich auch eine Klasse von Hemmstoffen für dieses Enzym verbessern, die keine Ähnlichkeit mit Nucleosiden aufweisen.

Die Genomforschung brachte weitere kritische Komponenten im Räderwerk der HIV-Vermehrung ans Tageslicht, an denen man ansetzen kann. Eine davon ist die RNase H, ein Teil der Reversen Transkriptase, der die neu zusammengefügte HIV-DNA von der RNA trennt. Eine weitere Achillesferse des Aids-Virus ist das aktive Zentrum der Integrase – jenes Enzyms, das die Virus-DNA in das Erbgut der infizierten Zelle einbaut. Ein Integrasehemmer wird zur Zeit an HIV-infizierten Freiwilligen erprobt.

Sand im Getriebe des Proteinsyntheseapparats

Alle Viren müssen irgendwann im Laufe ihres Vermehrungszyklus die in ihrem Erbgut verschlüsselten Proteine herstellen. Der erste Schritt dazu ist die Transkription: das Umschreiben der diversen Gene in mobile Stränge einer so genannten Boten-RNA. Diese werden dann in den Proteinfabriken der Wirtszelle in Eiweißstoffe übersetzt. Mehrere in Entwicklung befindliche Medikamente haken bei der Transkription ein: Sie sorgen dafür, dass sich keine „Transkriptionsfaktoren“ an die Virus-DNA anheften; ohne diese aber kommt die Produktion der Boten-RNA nicht in Gang.

Die Genomik half beim Aufspüren vieler Angriffspunkte für solche Wirkstoffe. DNA-Analysen führten aber auch auf einen ganz neuen Medikamententyp: die so genannten Anti-Sense-Moleküle. Wenn sich bei der Genomforschung herausstellt, dass ein Virus ein bestimmtes Protein unbedingt braucht, kann man ein maßgeschneidertes DNA-Fragment herstellen, das sich fest an einen Teil der zugehörigen Boten-RNA bindet und sie auf diese Weise abdeckt; dann wird das ▶

Protein nicht mehr produziert. Ein Anti-Sense-Molekül namens Fomivirsen dient heute schon bei Aids-Patienten zur Behandlung einer speziellen Augeninfektion, die vom Cytomegalievirus verursacht wird. Analoge Wirkstoffe für andere Viruserkrankungen befinden sich in der Entwicklung; einer davon blockiert die Produktion des Proteins Tat, das für die Transkription bestimmter HIV-Gene gebraucht wird.

Anhand ihrer Erkenntnisse über Virusgenome haben Wirkstoffforscher auch Stellen identifiziert, an denen virale RNA durch Ribozyme – enzymatisch aktive RNA-Moleküle – spaltbar ist. Ein entsprechendes Molekül namens Heptazym wird an Patienten mit Hepatitis C erprobt, und Ribozyme gegen HIV befinden sich im Frühstadium der Entwicklung. Teils lassen sich die Spaltwerkzeuge auch gentechnisch herstellen: Man konstruiert geeignete künstliche Gene und schleust sie in Zellen ein, die daraufhin das gewünschte Ribozym produzieren. Andere Ansätze zu einer Gentherapie von HIV benutzen spezialisierte Antikörper, die sich ihr Ziel in den infizierten Zellen suchen, oder vergleichbare Proteine, die an bestimmte Gensequenzen des Virus andocken.

Bei manchen Viren, darunter HIV, entsteht zunächst eine lange, zusammenhängende Eiweißkette, die erst nachträglich in die funktionsfähigen Einzelproteine zerlegt wird. Für die Spaltung sorgt eine so genannte Protease. Dieses Enzym rückte schon früh als möglicher Angriffspunkt ins Blickfeld der Pharmaforscher. Umfangreichen computergestützten Strukturuntersuchungen ist es zu einem großen Teil zu verdanken, dass seit den frühen 1990er Jahren wirksame Proteasehemmer zur Verfügung stehen. In Kombination mit anderen HIV-Medikamenten verbessern sie den Gesundheitszustand und verlängern das Leben vieler Betroffener. Allerdings rufen sie häufig unangenehme Nebenwirkungen hervor – so kann sich Fett an ungewöhnlichen Stellen ablagern. Eine neue Generation von Proteasehemmern, die derzeit entwickelt wird, soll weniger unliebsame Begleiterscheinungen zeigen.

Verkehrshindernisse

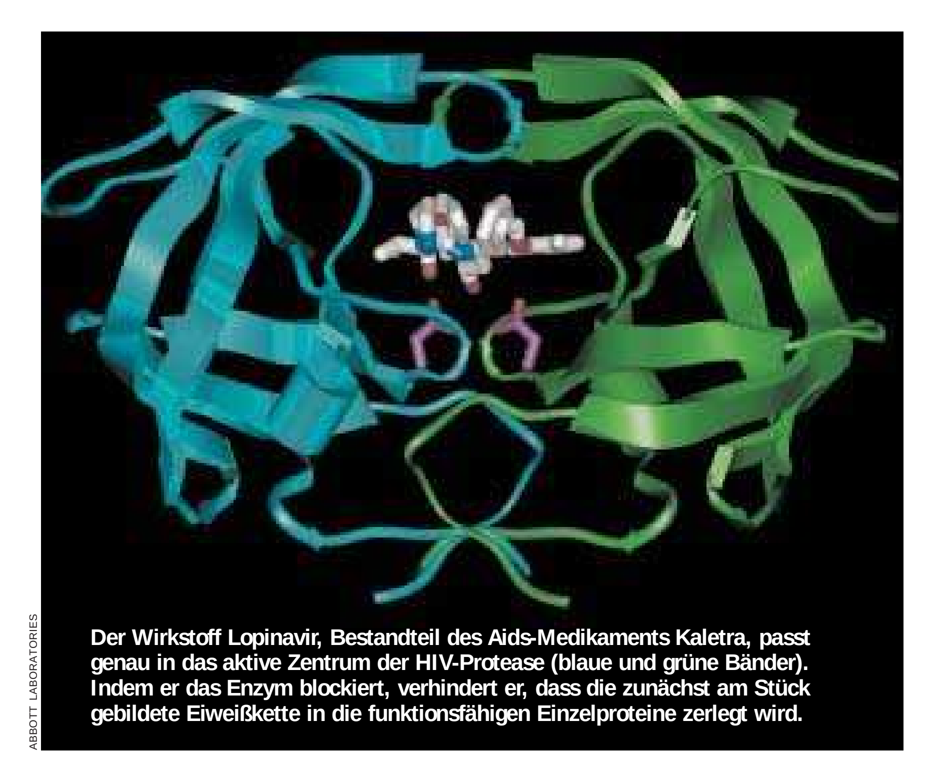
Selbst wenn das Erbgut eines Virus in der Wirtszelle erfolgreich vervielfältigt und in Proteine übersetzt worden ist, besteht keine Gefahr, solange die neuen Viruspartikel nicht entweichen und andere Zellen infizieren können. Hier setzen Zanamivir und Oseltamivir an, zwei neue Medikamente gegen Grippe. Wie man schon seit langem weiß, kommt an der Oberfläche der beiden wichtigsten Typen des Influenza-Virus (A und B) ein Protein namens Neuraminidase vor, ohne das sich die frisch gebildeten Virusteilchen nicht aus ihrer Wirtszelle befreien können. Dem Ergebnis eines Genomvergleichs zufolge sieht das aktive Zentrum der Neuraminidase bei verschiedenen Stämmen des Influenza-Virus sehr ähnlich aus. Nach eingehenden Strukturanalysen gelang es, Moleküle zu entwerfen, die sich an dieser Stelle anheften (siehe „Entwaffnung von Grippeviren“, Spektrum der Wissenschaft, 3/1999, S. 70).

Medikamente vermögen die Ausbreitung der Viren von Zelle zu Zelle aber auch zu verhindern, indem sie die Immunantwort verstärken. Das kann auf unspezifische Weise geschehen. Das Medikament wirkt dann nicht nur gegen einen bestimmten Erreger, sondern dämmt die Verbreitung verschiedener Eindringlinge ein. An einer solchen generellen Immunabwehr sind in der Natur die Interferone beteiligt; sie hemmen die Proteinsynthese und andere Schritte der Virusvermehrung in den infizierten Zellen. Um ihre Konzentration und Wirkung zu steigern, kann man sie Patienten zusätzlich als Arzneimittel zuführen. So wurde Alpha-Interferon, eine Form des menschlichen Interferons, zu einer wichtigen Waffe gegen Hepatitis B und C. (Bei Hepatitis C verabreicht man es zusammen mit dem synthetischen Nucleosid Ribavirin.) Auch andere Interferone werden als antivirale Medikamente erprobt.

Zu den gezielteren Immunreaktionen gehört die Produktion von Antikörpern. Sie erkennen jeweils bestimmte Proteinabschnitte auf der Oberfläche eingedrungener Viren und heften sich daran. Auf diese Weise kennzeichnen sie das Virus, damit es von anderen Komponenten des Immunsystems zerstört wird. Ist das Gen für ein solches Virus-Oberflächenprotein entziffert, lassen sich reine, „monoklonale“ Antikörper gegen einen ausgewählten Abschnitt des Eiweißstoffs künstlich herstellen (siehe „Die Rückkehr der Zauberkugeln“, Spektrum der Wissenschaft, 9/2002, S. 64). Ein monoklonaler Antikörper gegen das respiratorisch-syncytiale Virus ist bereits auf dem Markt; ein anderer wird an Patienten mit Hepatitis B erprobt.

Schließlich legt der Vergleich der Genome von Viren und Menschen noch eine andere Möglichkeit nahe, die Körperabwehr gegen die Erreger zu verstärken. Wie sich herausgestellt hat, produzieren manche Viren Proteine, die in ganz ähnlicher Form auch im Zuge der Immunantwort entstehen. Damit beeinträchtigen sie die Funktion des Abwehrsystems, sodass sie der Zerstörung entgehen. Substanzen, die diese schützenden Proteine unwirksam machen, erhalten die volle Kraft der Immunantwort und sorgen deshalb bei vielen Viruserkrankungen für eine schnellere Genesung. Die Suche nach solchen Mitteln ist im Gange.

Trotz des atemberaubenden Tempos, mit dem immer neue antivirale Wirkstoffe entdeckt werden, gilt es aber auch einer unangenehmen Realität ins Auge zu blicken: Viren dürften es letztlich den



ABBOTT LABORATORIES

Der Wirkstoff Lopinavir, Bestandteil des Aids-Medikaments Kaletra, passt genau in das aktive Zentrum der HIV-Protease (blaue und grüne Bänder). Indem er das Enzym blockiert, verhindert er, dass die zunächst am Stück gebildete Eiweißkette in die funktionsfähigen Einzelproteine zerlegt wird.

Entschlüsselte Viren

Von diesen medizinisch bedeutsamen Viren wurde bereits das Erbgut entziffert. Die erste vollständige Sequenzierung eines Virusgenoms gelang 1977 Frederic Sanger und seinen Kollegen von der Universität Cambridge.

Virus	Krankheit	Jahr der Sequenzierung
menschliches Poliovirus	Poliomyelitis (Kinderlähmung)	1981
Influenza-A-Virus	Influenza (Grippe)	1981
Hepatitis-B-Virus	Hepatitis B	1984
menschliches Rhinovirus Typ 14	gewöhnliche Erkältung	1984
HIV-1	Aids	1985
menschliches Papilloma-Virus Typ 16	Cervixkarzinom	1985
Denguevirus Typ 1	Denguefieber	1987
Hepatitis-A-Virus	Hepatitis A	1987
Herpes-simplex-Virus Typ 1	Lippenbläschen	1988
Hepatitis-C-Virus	Hepatitis C	1990
Cytomegalievirus	Netzhautentzündungen bei HIV-Infizierten	1991
Variolavirus	Pocken	1992
Ebolavirus	Ebola (hämorrhagisches Fieber)	1993
Respiratorisch-syncytiales Virus	Atemwegsinfektionen bei Kindern	1996
menschliches Parainfluenza-Virus 3	Atemwegsinfektionen bei Kindern	1998

Bakterien gleichtun und gegen viele Medikamente irgendwann Resistenzen entwickeln. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist besonders hoch, wenn ein Wirkstoff über längere Zeit eingesetzt wird, beispielsweise bei chronischen Krankheiten wie der HIV-Infektion oder in manchen Fällen von Hepatitis B und C. Tatsächlich gibt es gegen alle zugelassenen HIV-Medikamente bereits resistente Virusstämme; viele davon sind sogar gegen mehrere Wirkstoffe unempfindlich.

Das Gespenst der Resistenz

Resistenzen entstehen, weil viele Erreger – vor allem RNA-Viren und ganz besonders HIV – die fatale Neigung haben, sehr schnell zu mutieren. Versetzt eine solche Mutation den Virusstamm in die Lage, ein Hindernis zu seiner Vermehrung (beispielsweise ein Medikament) zu überwinden, kann er sich selektiv ausbreiten.

Um im Wettlauf mit Resistenzen die Nase vorn zu behalten, müssen die Pharmaforscher also immer neue Medikamente entwickeln – oder die vorhandenen nachrüsten. Tauchen Mutanten auf, die einen bestimmten Wirkstoff tolerieren, kann man ihr Genom sequenzieren und so feststellen, an welcher Stelle es verändert ist. Dies liefert möglicherweise einen Anhaltspunkt dafür, wie das betroffene Virusprotein dem Medikament ausweicht. Dann kann man mit Strukturuntersuchungen und anderen Analysen Wege ergründen, den Wirkstoff so abzuwandeln, dass er die Resistenz unterläuft.

Pharmahersteller wählen neue Wirkstoff-Kandidaten inzwischen auch gezielt danach aus, ob sie versprechen, Virusstämme zu bekämpfen, die gegen andere Medikamente bereits resistent sind. Ein Beispiel ist DPC083, ein nicht-nucleosidischer Inhibitor für die Reverse Transkriptase von HIV. DuPont Pharma hoffte damit die Unempfindlichkeit gegen Nucleosid-Analoga zu überwinden. Forscher der Firma untersuchten die für die Resistenz verantwortlichen Mutationen im Gen der Reversen Transkriptase und konstruierten dann am Computer Moleküle, die auch das mutierte Enzym hemmen sollten. Anschließend stellten sie gentechnisch Viren her, welche die abgewandelte Reverse Transkriptase produzierten, und wählten die Verbindung aus, die die Vermehrung dieser Viren am besten unterdrückte. Nach der Übernahme von DuPont Pharma durch Bristol Myers Squibb scheint das Interesse an DPC083 allerdings gesunken: Eine Studie an HIV-infizierten Patienten wurde abgebrochen.

Bis sich praktisch alle ernsthaften Viruserkrankungen entweder durch Impfstoffe verhüten oder medikamentös behandeln lassen, wird sicher noch einige Zeit vergehen. Nachdem aber jetzt die Sequenz des gesamten menschlichen Genoms in vorläufiger Form vorliegt, dürften die Pharmaforscher auf eine Vielzahl bislang unbekannter Proteine stoßen, welche die Produktion virushemmender Antikörper ankurbeln oder andere Teile des Immunsystems im Kampf gegen die Viren stärken. Ich rechne fest damit, dass sich solche Entdeckungen in neue Arzneimittel ummünzen lassen. Dies und andere hoch entwickelte Verfahren der Wirkstoffsuche werden uns mit Sicherheit in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren eine Fülle dringend notwendiger antiviraler Medikamente bescheren. ■

William A. Haseltine *ist Vorstandsvorsitzender von Human Genome Sciences und Chefredakteur des* Journal of Regenerative Medicine. *Er hat an der Harvard-Universität in Cambridge in Biophysik promoviert und war von 1988 bis 1995 Professor am Dana-Farber Cancer Institute der Harvard Medical School sowie an der Harvard School of Public Health. Seinem Team gelang es als Erstem, das Genom des Aids-Virus zu entziffern. Haseltine hat seit 1981 an der Gründung von über zwanzig Biotechnologiefirmen mitgewirkt.*



Literaturhinweise

Protein Design of an HIV-1 Entry Inhibitor. Von Michael J. Root, Michael S. Kay und Peter S. Kim in: Science, Bd. 291, Nr. 5505, S. 884; 2.2.2001.

New Technologies for Making Vaccines. Von Ronald W. Ellis in: Vaccine, Bd. 17, Nr. 13, S. 1596; 26.3.1999.

Strategies for Antiviral Drug Discovery. Von Philip S. Jones in: Antiviral Chemistry and Chemotherapy, Bd. 9, Nr. 4, S. 283; 7/1998.

Weblinks zum Thema finden Sie bei **www.spektrum.de** *unter „Inhaltsverzeichnis“.*



Die Ungerechtigkeit der Wahlverfahren – konkret

Absolute Wahlgerechtigkeit kann es nicht geben – nicht einmal in der Theorie (siehe Teil II dieser Serie im September-Heft). Aber die Praxis ist noch schlimmer: Der Mathematiker Friedrich Pukelsheim führt am Beispiel der bayerischen Kommunalwahlen vor, zu welch massiven Ungleichgewichten sich selbst kleine Rundungsfehler aufaddieren können (Seite 75).

Die schöne Vision des Philosophen und Mathematikers Gottfried Wilhelm Leibniz, man möge die Lösung von Konflikten durch Ausrechnen finden statt durch Ausfechten, stellt sich also abermals als unrealistisch heraus. Vielleicht nicht ganz: Wie der Wirtschaftsforscher Michel Balinski zeigt, hätte etwas Mathematik, beizeiten angewandt, ein politisches Problem Mexikos elegant gelöst.



WAHLEN IN MEXIKO

Verhältniswahlrecht häppchenweise

Die mexikanischen Wahlgesetze bieten eine Fülle von Beispielen für Manipulationsversuche, für groben mathematischen Unverstand – oder gar beides.

Von Michel Balinski

Die Regeln des Wahlgeschäfts werden in Mexiko vollständig offen gelegt, was eine Analyse sehr erleichtert. Dagegen geben viele andere Länder nur die endgültige Sitzverteilung bekannt; wie sie sich ergibt, ist nur mühsam herauszufinden. Und in Mexiko gibt es allerlei zu analysieren!

Die mexikanische Verfassung von 1917 schuf ein Parlament aus zwei Kammern, dem Abgeordnetenhaus und dem Senat. Anfänglich umfasste das Abgeordnetenhaus 300 Abgeordnete, die einer pro Wahlkreis nach dem Mehrheitswahlrecht gewählt wurden. Die erdrückende Übermacht der „Partei der institutionalisierten Revolution" (*Partido Revolucionario Institucional*, PRI) ließ keiner der anderen Parteien die Chance, auch nur ein Mandat zu erlangen. Daher wuchs ab 1963 die Forderung, das Wahlsystem mit einer kleinen Beimischung Verhältniswahlrecht zu ergänzen, damit auch die anderen Parteien Gehör (wenigstens das) finden würden. Nach und nach wurde dieser Anteil stärker. Seit 1987 werden zusätzlich zu den 300 „lokalen" Abgeordneten aus den Wahlkreisen 200 „politische" Abgeordnete aus Landeslisten der Parteien gewählt.

Entsprechend hat jeder Wähler zwei Stimmen, die eine zur Wahl des Direktkandidaten in seinem Wahlkreis, die andere zur Wahl der Parteiliste in seiner Wahlregion. Das ist zumindest grob dem deutschen System mit Erst- und Zweitstimme vergleichbar.

Das gesamte Wahlgebiet ist in fünf große Wahlregionen unterteilt, für die jede Partei Kandidatenlisten einreicht. In jeder Wahlregion werden vierzig Listenmandate vergeben, abhängig von den auf die Parteilisten entfallenden Stimmen, aber auch abhängig von der Zahl der von Vertretern der jeweiligen Partei errungenen Direktmandate. Die entscheidende Frage ist, wie die Zuteilung dieser vierzig Ergänzungsmandate berechnet wird. Jede Regierung gab darauf eine andere Antwort, mehr schlecht als recht. Im Laufe der Zeit wurden die Antworten zwar besser, aber alle leiden unter inneren Widersprüchen.

Nach siebzig Jahren Vorherrschaft der PRI gab es bei der Präsidentschaftswahl 1988 ein jähes Erwachen. Carlos Salinas de Gortari von der PRI wurde zwar gewählt, aber das stand erst fest, nachdem eine ganze Woche für die Auszählung des knappen Wahlergebnisses ins Land gegangen war. Prompt wurde 1989 ein neues Wahlgesetz verabschiedet, das voller Widersprüche war. So garantierte es, neben anderen Absurditäten,



THOMAS BRAUN / SDW

unter gewissen Umständen jeder von zwei Parteien eine absolute Mehrheit von 251 Abgeordneten! Bei den Wahlen von 1991 erhielt die PRI 320 Sitze.

Eine neues, 1994 verabschiedetes Wahlgesetz minderte zwar die Widersprüche, löste sie jedoch nicht gänzlich auf. Es verschaffte der PRI bei den Wahlen des gleichen Jahres die immer noch komfortable Mehrheit von 300 Sitzen. Auf die Wahlergebnisse von 1985, 1988 und 1991 angewandt hätte es der PRI 315, 300 und 315 Sitze beschert: eine bemerkenswerte Stabilität.

Am 14. November 1996 wurde wiederum ein neues Wahlgesetz beschlossen. Besser als das alte, aber immer noch in sich unstimmig, erwies es sich schon bei den Wahlen von 1997 als nicht anwendbar. Es schreibt vor, dass die 200 Listenmandate den Parteien gemäß den Stimmenzahlen im gesamten Wahlgebiet nach der Methode der größten Reste („Hare/Niemeyer“) zuzuteilen sind, allerdings mit zwei Einschränkungen: Keine Partei darf mehr als 300 Abgeordnete bekommen, und ihr Abgeordnetenanteil an den 500 Sitzen darf nicht um mehr als 8 Prozentpunkte über dem Stimmenanteil liegen.

Anhand der Wahlergebnisse von 1997 seien die Bestimmungen verdeutlicht. Fünf Parteien traten zur Wahl an. Von den 300 Direktmandaten entfielen auf die PAN 64, die PRI 165, die PRD 70, die PT eines und die PVEM keines. Die Tabelle unten zeigt die Stimmenzahlen der Parteien, aufgegliedert nach den fünf Wahlregionen.

Die PRI durfte angesichts ihres Gesamtstimmenanteils von 39,96 Prozent nicht mehr als 47,96 Prozent der 500 Sitze erhalten, das heißt maximal 239,8 Sitze. Über die 165 Direktmandate hinaus konnten ihr also noch höchstens 74 Listenmandate zugeteilt werden. Da 39,96 Prozent von 200 Listenmandaten 79,9 Sitze ergäbe, schöpfte die PRI ihr Kontingent von 74 Sitzen voll aus. Die Zuteilung der verbleibenden 126 Listenmandate mittels der Methode der größten Reste führt zu folgendem Zwischenergebnis: PAN 57, PRI 74, PRD 55, PT 6 und PVEM 8.

Wie werden nun diese Sitze an die beteiligten Parteilisten der fünf Regionen weitergereicht?

Das Gesetz schreibt folgendes Vorgehen vor. Erstens werden die Sitze einer Partei, die an die Obergrenze stößt, ihren in den fünf Wahlregionen vorgelegten Listen zugeteilt. Für die PRI ergeben sich die Zuteilungen 15, 17, 15, 14 und 13. Zweitens werden die in jeder Wahlregion verbleibenden Sitze – das sind also 25, 23, 25, 26 und 27 – an die anderen Parteilisten vergeben, und zwar jeweils mit der Methode der größten Reste. Daraus ergibt sich die Zuteilung aus der Tabelle rechts oben. Aus Sicht des Gesamt-Wahlergebnisses ist das ein Skandal: Die PAN kann 57 Sitze beanspruchen, bekommt aber nur 56, die PRD erhält zwei Sitze zu viel, während die kleinste Partei, die PVEM, wiederum einen Abgeordneten verliert!

Wie kommt dieser Skandal zu Stande? Ganz einfach dadurch, dass die Vergabe der verbleibenden Sitze sich ausschließlich an den Wahlregionen (den Zeilen der Tabelle) orientiert und nicht berücksichtigt, wie viele Stimmen insgesamt auf jede Partei entfallen (die Spalten der Tabelle), mit Ausnahme der PRI. Wie konnte ein solcher Konstruktionsfehler unbemerkt bleiben? Es gibt eine plausible Erklärung: Wenn man das Verfahren probeweise auf das Wahlergebnis von 1994 anwendet, treten keine Widersprüche zu Tage. Mehr oder weniger zufällig hätten 1994 die Sitzzuteilungen an die Parteien mit deren Soll übereingestimmt.

Region	PAN	PRI	PRD	PT	PVEM	Summe
I	2 504 484	2 379 785	1 019 822	118 673	197 098	6 219 862
II	2 138 564	2 543 570	687 162	303 794	112 721	5 785 811
III	909 386	2 354 047	1 377 933	126 342	90 373	4 858 081
IV	1 237 297	2 098 581	2 385 525	123 612	424 672	6 269 687
V	1 005 807	2 062 736	2 048 461	83 704	291 273	5 491 981
Summe	7 795 538	11 438 719	7 518 903	756 125	1 116 137	28 625 422
%	27,23	39,96	26,27	2,64	3,90	100

Ergebnis der Parlamentswahlen in Mexiko 1997, aufgegliedert nach Wahlregionen und Parteien

Region	PAN	PRI	PRD	PT	PVEM	Summe
I	16↑	15	7↓	1	1	40
II	15	17	5	2	1	40
III	9	15	14↓	1↑	1	40
IV	8	14	15	1↓	2↑	40
V	8	13	16	1	2	40
Summe	56↑	74	57↓↓	6	7↑	200

Zuteilung der 200 Listenmandate nach der Wahl von 1997 gemäß dem Wahlgesetz von 1996. Die Korrekturen der Wahlkommission sind durch Pfeile angedeutet (Pfeil nach oben: ein Sitz mehr, Pfeil nach unten: ein Sitz weniger).

Regionalproporz innerhalb der Parteien

In der Tat hatte das vorhergehende Gesetz für die Zuteilung nur die Stimmensummen der Parteien berücksichtigt (die Spalten der Tabelle). Das hatte zur Folge, dass anstelle von jeweils genau 40 Sitzen 1994 auf die Wahlregionen 36, 39, 39, 43 und 43 Sitze entfielen. Vermutlich war dieses Phänomen der Anlass für die Wahlgesetzänderung von 1996. Nur hatte die, indem sie die eine Ungerechtigkeit beseitigte, die andere erst geschaffen.

Als die mit der Wahldurchführung beauftragte Kommission, der *Consejo General del Instituto Federal Electoral*, sich bewusst wurde, dass das Gesetz versagte, erfand sie eine Ad-hoc-Korrekturregel – ein Graus für jeden rechtsstaatlich denkenden Menschen! Gleichwohl halfen die nach dieser Regel ermittelten Korrekturen (Pfeile in der Tabelle oben) der Gerechtigkeit auf, denn durch sie kam die Verteilung einem doppelten Ziel näher: jeder Parteiliste ihr Soll und gleichzeitig jeder Wahlregion 40 Mandate zuzuweisen.

Mathematisch läuft das auf die Aufgabe hinaus, eine Tabelle zu erstellen, in der sowohl jede Zeilensumme, das heißt die Summe der Felder jeder Zeile, den vorgeschriebenen Wert 40 annimmt als auch jede Spaltensumme den Wert, wel- ▶



cher der landesweiten Gesamtstimmenzahl der jeweiligen Partei entspricht. Für die Lösung dieses Problems ist die Methode von Sainte-Laguë (Spektrum der Wissenschaft 09/2002, S. 80) besser geeignet als die Methode der größten Reste, weshalb wir uns im Folgenden auf sie konzentrieren.

Wenn man einerseits die Methode von Sainte-Laguë auf jede Partei für sich (spaltenweise, ganz im Sinne des Gesetzes von 1994) anwendet und dabei für jede Region (das heißt in jeder Zeile) zufällig 40 Abgeordnete herauskommen, dann hätte niemand gegen das Ergebnis etwas einzuwenden. Wenn man andererseits die Methode von Sainte-Laguë auf jede Region für sich anwendet (zeilenweise, im Sinne des Gesetzes von 1996) und sich dabei für die Gesamt-Sitzzahlen der Parteien (die Spaltensummen) zufällig die richtigen Werte ergeben, dann ist es auch gut.

Wenn beide Ansätze gültige Zuteilungen – das heißt mit den richtigen Zeilen- und Spaltensummen – liefern würden, welche wäre dann vorzuziehen? Keine Sorge; in diesem Falle wären beide Ergebnisse gleich. Aber wenn keine der beiden Zuteilungen gültig wäre, was dann?

Erinnern wir uns daran, wie man die Methode von Sainte-Laguë auch interpretieren kann (siehe den zitierten Beitrag): Man sucht einen Divisor x mit der Eigenschaft, dass die Stimmenzahlen, dividiert durch x und auf die nächstgelegene ganze Zahl gerundet, sich genau zu den vorgegebenen Gesamtzahlen (Zeilen- beziehungsweise Spaltensummen) addieren. Diese Division durch x ist nichts anderes als ein Wechsel der Maßeinheit: Die Anzahl der Wähler wird nicht mehr in Menschen, sondern in Vielfachen von x ausgedrückt. Und auf das eigentliche Problem sollte diese Umrechnung keinen Einfluss haben, ebenso wie es für die Physik belanglos ist, ob man Längen in Fuß oder in Meter ausdrückt.

Wenn man also in der Tabelle der Stimmenzahlen eine Zeile durch einen Zeilendivisor teilt, so ist dies nur ein Übergang zu einer anderen Skala, der an dem Stimmenverhältnis der Parteien in der entsprechenden Region nichts ändert. Wenn man entsprechend eine Spalte durch einen Spaltendivisor teilt, so bleibt das Verhältnis zwischen den Regionen unter den Stimmen für die entsprechende Partei unberührt.

Diese Überlegungen führen auf eine Variante der Methode von Sainte-Laguë, die als einzige das Zuteilungsproblem bei vorgelegter Stimmentabelle löst, ohne dabei dem Parteienproporz (Spaltensummen) oder dem Regionenproporz (Zeilensummen) Vorrang zu geben. Nennen wir sie das doppeltproportionale Verfahren von Sainte-Laguë.

Die Methode lässt sich folgendermaßen beschreiben. Für jede Zeile und für jede Spalte bestimme man einen Divisor und teile jedes Tabellenelement sowohl durch den Divisor seiner Zeile als auch durch den Divisor seiner Spalte, runde das Ergebnis auf die nächstgelegene ganze Zahl, und das ergibt die jeweilige Sitzzahl. Zeilen- und Spaltendivisoren sind dabei durch einen iterativen Algorithmus so zu bestimmen, dass Zeilen- und Spaltensummen die vorgegebenen Werte annehmen (Kasten links). Das Ergebnis des Verfahrens ist eindeutig (außer wenn an zwei Plätzen der Tabelle exakt die gleichen Stimmenzahlen stehen).

Das Ziel der mexikanischen Gesetzgeber ist klar: Die Sitzzuteilung sollte sowohl zeilen- als auch spaltenweise die Verhältnisse in der Stimmentabelle korrekt wiedergeben. Ist den mexikanischen Regierungsbürokraten vorzuwerfen, dass sie die zielführende Lösungsmethode nicht gefunden haben? Wohl kaum, denn das ist nicht ihr Metier, und die Lösung ist nicht gerade offensichtlich. Aber sie hätten die Fachleute fragen können. Manchmal eignet sich Mathematik sogar zur Lösung politischer Probleme. ■

Das doppeltproportionale Verfahren von Sainte-Laguë

Doppelte Wahlgerechtigkeit

Region		PAN	PRI	PRD	PT	PVEM
	Divisor →	1 367	1 546	1 378	1 260	1 395
I	109	16,808	14,104	6,790	0,864	1,296
II	100	15,644	16,453	4,987	2,411	0,808
III	84	7,920	18,127	11,904	1,194	0,771
IV	110	8,228	12,340	15,738	0,892	2,767
V	96	7,664	13,898	15,485	0,692	2,175

Diese Tabelle enthält die Stimmenzahlen der Wahl von 1997 (Tabelle Seite 73 unten), dividiert durch die angegebenen Zeilen- und Spaltendivisoren. Zum Beispiel ergibt sich für den Tabelleneintrag der Partei PAN in der Wahlregion I: $2\,504\,484 \,/\, (109 \times 1367) = 16{,}808$. Die Divisoren findet man mit folgendem Verfahren:

(1) Man bestimme für jede Spalte einzeln einen Divisor, der für diese Spalte eine Sainte-Laguë-Zuteilung liefert, das heißt, dass die zur nächsten ganzen Zahl gerundeten Quotienten die für diese Spalte vorgegebene Sitzzahl ausschöpfen. Man ersetze die ursprünglich vorgegebenen Stimmenzahlen durch diese – nicht gerundeten – Quotienten.

(2) Man bestimme für jede der Zeilen einzeln einen Divisor, der in der Zeile eine Sainte-Laguë-Zuteilung ergibt, die sich zu 40 Sitzen aufsummiert. Man ersetze die Tabelleneinträge – das sind inzwischen die Quotienten aus Schritt 1 – durch die neuen Quotienten, die sich bei Division durch die Zeilendivisoren ergeben.

(3) Wenn jetzt die Spaltensummen immer noch die geforderten Werte haben, ist das Verfahren beendet. Ansonsten gehe man wieder zu Schritt 1, bestimme neue Spaltendivisoren und so weiter, stets zwischen Spalten und Zeilen abwechselnd. Mit einigen zusätzlichen Vorkehrungen konvergiert das Verfahren fast immer gegen eine eindeutige Lösung.

Die gerundeten Tabellenwerte (rechts) stellen die endgültige Sitzzuteilung nach diesem Verfahren dar. Sie unterscheiden sich von der von der Wahlkommission tatsächlich vollzogenen Zuteilung (Tabelle Seite 73 oben) in 13 von 25 Fällen (unterstrichene Zahlen); das ist mehr als die Hälfte der Fälle!

Region	PAN	PRI	PRD	PT	PVEM	Summe
I	17	14	7	1	1	40
II	16	16	5	2	1	40
III	8	18	12	1	1	40
IV	8	12	16	1	3	40
V	8	14	15	1	2	40
Summe	**57**	**74**	**55**	**6**	**8**	**200**

Michel Balinski *ist seit 1989 Professor für Wirtschaftswissenschaften an der École Polytechnique in Paris. Er befasst sich in seiner Forschungsarbeit mit diskreter Optimierung und vor allem mit Wahlsystemen.*



Wahlgleichheit – Muster ohne Wert?

Für einen Kreistagssitz in Bayern müssen große Parteien regelmäßig weniger Wähler aufbringen als kleine. Ohne Not verletzt damit das geltende Zuteilungsverfahren einen hochrangigen Grundsatz: die so genannte Erfolgswertgleichheit.

Von Friedrich Pukelsheim

Bei den bayerischen Kommunalwahlen am 3. März 2002 konnte die CSU 45,5 Prozent der Stimmen auf sich vereinigen und war damit die erfolgreichste Partei. Da der Wahl ein Verhältniswahlrecht zu Grunde liegt, müsste nach einer einfachen Überschlagsrechnung die Partei von den umkämpften 5556 Sitzen ungefähr 45,5 Prozent zugeteilt bekommen haben, also 2528 Sitze. Tatsächlich hat die CSU 81 Sitze mehr gewonnen, nämlich 2609. Der Unterschied ist größer als der gesamte Münchner Stadtrat! Das weist auf schwer wiegende Verzerrungseffekte hin, die im Gemeinde- und Landkreiswahlgesetz eingebaut sind.

Die Verzerrungen fallen noch drastischer aus, wenn man die Wahlergebnisse im Einzelnen beachtet. Man überprüfe jede der 25 Stadtrats- und 71 Kreistagswahlen einzeln und berechne die Abweichungen der Sitzzahlen von den verhältnismäßigen Anteilen jeder Partei. Zählt man diese Abweichungen zusammen, so schießen ausschließlich die beiden größten Parteien über ihren verhältnismäßigen Sitzanteil hinaus, und zwar nicht nur um 81, sondern zusammen sogar um gut 95 Sitze. Von den in Stadt und Land zu vergebenden Mandaten wird also eine beträchtliche Zahl am Verhältnis der Wählerstimmen vorbei als Bonussitze einer der beiden größeren Parteien zugeteilt. Entsprechend viele Sitze entgehen den kleinen Parteien, die eigentlich einen Anspruch darauf haben.

Die im Gemeinde- und Landkreiswahlgesetz vorgeschriebene Verrechnungsmethode von Stimmen in Mandate ist das Verfahren der größten Quotienten nach d'Hondt (siehe den Beitrag von Henri Carnal und Hans Riedwyl im Septemberheft, S. 80); es führt offensichtlich zu Verzerrungen zu Gunsten der größeren und zum Nachteil der kleineren Parteien.

Die Prämierung der Großen auf Kosten der Kleinen müsste natürlich ertragen werden, wenn es keine bessere Alternative gäbe. Dem ist aber nicht so. Bei der geltenden Methode werden die auf die einzelnen Parteien entfallenden Wählerstimmen fortlaufend durch die Zahlen 1, 2, 3, … geteilt, die sich ergebenden Quotienten nach fallender Größe gereiht und die Sitze gemäß dieser Reihung den Parteien zugeteilt.

Sainte-Laguë: das unverzerrte Verfahren

Eine unscheinbar aussehende Änderung dieser Vorschrift führt zu der Zuteilungsmethode, die mit dem Namen Sainte-Laguë verbunden wird (zu den Namen siehe meinen Beitrag im Septemberheft, Seite 83): Statt durch die natürlichen Zahlen 1, 2, 3, … teile man nur durch die ungeraden Zahlen 1, 3, 5, … Wendet man dieses Verfahren auf die Stimmenergebnisse der Kommunalwahlen an, so verringert sich die Anzahl der Bonussitze von 95 auf 9 – weniger als ein Zehntel. Zudem trifft die Begünstigung nunmehr nicht nur die Großen, sondern verteilt sich auf die zweit-, fünft-, siebt- und achterfolgreichsten Parteien und Listenverbindungen. Demnach sind die Sitzzahlen nach der Zuteilungsmethode von Sainte-Laguë praktisch unverzerrt zu nennen.

Die Methode von Sainte-Laguë ist in Deutschland keineswegs ungeläufig. Sie wird – unter dem Namen Rangmaßzahlverfahren von Sainte-Laguë/Schepers – vom Bundestag für die Besetzung der ▶





Erfolgswert einer Wählerstimme

Welchen Einfluss hat meine Stimme?

Ein einleuchtendes Prinzip ist: Die Anzahl der Stimmen, für die es einen Sitz im Parlament gibt, sollte für jede Partei dieselbe sein. Diese Zahl, genauer: der Quotient „Stimmenzahl p_i für eine Partei durch Anzahl s_i der Mandate für diese Partei“, ist sozusagen der „Preis“ eines Sitzes, ausgedrückt in der Einheit Wählerstimmen. Bei der Bundestagswahl 1998 hat die PDS ihre Sitze mit 69874 Stimmen pro Stück weitaus billiger bezahlt als die FDP mit 71650 Stimmen (Spektrum der Wissenschaft 09/2002, S. 81).

Vom Standpunkt des Wählers aus kommt es auf den Kehrwert s_i/p_i dieses Preises an: Der Beitrag, den meine Stimme zur Mandatsanzahl der von mir gewählten Partei leistet, sollte derselbe sein, einerlei welche Partei ich wähle. Der Wert s_i/p_i ist allerdings eine unanschaulich kleine Zahl: Es hilft mir wenig zu wissen, wie viele Millionstel eines Sitzes meine Stimme ausmacht. Besser ist es, diesen Wert mit seinem theoretischen Idealwert zu vergleichen: Meine Stimme sollte so viel wert sein wie der Quotient „Gesamtzahl S der Mandate durch Gesamtzahl P der Stimmen“.

Daher wird der Erfolgswert einer Wählerstimme für die Partei i definiert als $(s_i/p_i)/(S/P)$ oder, was dasselbe ist, $(s_i/S)/(p_i/P)$: Erfolgswert gleich Mandatsanteil von i durch Stimmenanteil von i. Im Idealfall ist der Erfolgswert einer Wählerstimme für jede Partei gleich 1. Für die CSU in den Stadträten von Ingolstadt, München und Rosenheim ergibt sich

	Stimmenzahl p_i	Gesamtstimmenzahl P	Mandatszahl s_i	Gesamt-Mandatszahl S	Erfolgswert $(s_i/S)/(p_i/P)$
Ingolstadt	1024987	1999485	26	50	1,014
München	12065797	33462818	30	80	1,040
Rosenheim	379393	811293	22	44	1,069

In allen drei Fällen hat also eine für die CSU abgegebene Wählerstimme mehr als den „korrekten“ Erfolg 1 erzielt, in Ingolstadt 1,4 Prozent mehr, in München 4 und in Rosenheim sogar 6,9 Prozent.

Ausschüsse im Verhältnis der Fraktionsstärken eingesetzt.

Der Unterschied in den Zuteilungsverfahren von Bundes- und Kommunalparlamenten ist leicht zu erklären. Auf Bundesebene ist in aller Regel eine kleine Partei an der Regierung beteiligt. Sie hat bei den Koalitionsverhandlungen Gelegenheit, ihre Interessen geltend zu machen und eine sie benachteiligende, verzerrende Zuteilungsmethode für die Ausschusssitzvergabe zu verhindern. Dagegen wird das Kommunalwahlgesetz nicht von den betroffenen Gremien beschlossen, sondern vom Landtag. Dort aber haben die meisten der von den Verzerrungen benachteiligten Parteien und Wählergruppen noch nicht einmal Sitz und Stimme. Die den Landtag dominierenden Parteien wiederum werden von der geltenden Zuteilungsmethode nach d’Hondt begünstigt und haben keinen Anlass, sich für eine unverzerrte Methode stark zu machen.

Immerhin stellt der Gesetzgeber den benachteiligten Kleinen ein Mittel zur Milderung der Ungerechtigkeit bereit. Parteien und Wählergruppen können sich verbinden, damit an Größe zulegen und davon bei der Zuteilungsrechnung profitieren. Allerdings steht der – sehr geringen – Milderung der Verzerrung ein massiver Verlust an Transparenz entgegen. Listenverbindungen bringen die Wähler in die eher kuriose Situation, in der Wahlkabine zwischen Parteien differenzieren zu sollen, die, kaum dass die Wahllokale geschlossen haben, sich zusammentun und gemeinsam marschieren.

Wahlgleichheit ist Erfolgswertgleichheit

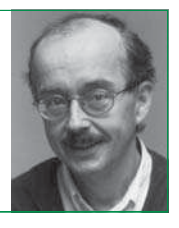
Es sind auch weniger die Parteien, die die auftretenden Verzerrungen zu beklagen hätten, als vielmehr die Wähler. Sie sind es, denen die Artikel 11 und 14 der Bayerischen Verfassung den Anspruch auf Wahlgleichheit bescheinigen: Jeder Stimme muss ein gleicher Erfolgswert zukommen. Die Verzerrungsrechnung für die Erfolgswerte der Wählerstimmen ist in den Einzelheiten etwas anders als für die Sitzzahlen der Parteien, führt aber zu derselben qualitativen Aussage: Die Methode von d’Hondt verzerrt die Erfolgswerte zu Gunsten der für größere Parteien abgegebenen Wählerstimmen und zu Lasten der für kleinere Parteien abgegebenen Wählerstimmen.

Der Bayerische Verfassungsgerichtshof hat über die Jahre hinweg beharrlich einschlägige Klagen wegen Verletzung des Gleichheitsgrundsatzes abgewiesen, weil er die Realität anders sieht. Für den Gerichtshof gibt es kein „Kommunalwahlergebnis“ als Zusammenfassung von Stadtrats- und Kreistagswahlen, und somit existieren auch keine 95 Bonussitze. Es gibt nur Einzelwahlen, und die in einer einzelnen Wahl auftretenden Verzerrungen seien von einem so geringem Ausmaß, dass die Wähler sie hinzunehmen hätten. Der Gerichtshof übersieht dabei, dass die Zusammenführung auf Landesebene die Verzerrungseffekte nicht verstärkt, sondern sogar ausgleicht.

Im landesweiten Kommunalwahlergebnis stellen 95 von 5556 Sitzen eine Verzerrung von 1,7 Prozent dar; in den Einzelwahlen werden folglich die Verzerrungen gelegentlich darunter liegen, in anderen Fällen deutlich darüber. Zum Beispiel ist der Verzerrungsanteil im Kreistag von Altötting mit 3,8 Prozent mehr als doppelt so groß. Darüber hinaus kommt dort eine absolute Mehrheit zu Stande, die sich allein aus den d’Hondt-Verzerrungen ableitet und nicht aus einer absoluten Mehrheit an Wählerstimmen.

Dass das Prinzip der Erfolgswertgleichheit der Wählerstimmen eine quantitative Konkretisierung zulässt, hat der Bayerische Verfassungsgerichtshof in keiner seiner bisherigen Entscheidungen gewürdigt. Wahlen bilden den grundlegenden legitimationsstiftenden Akt in einer Demokratie. Der strikte Gleichheitsgrundsatz, den die Wähler dabei geltend machen können, wird von der Verfassungsgerichtsbarkeit immer wieder in hehren Worten gepriesen. Wird er aber handfest eingefordert, sieht die Sache auf einmal anders aus, und das Ideal verkommt zu einem Muster ohne Wert. Ein Gleichklang von Wort und Zahl, der so leicht möglich wäre und den viele verfassungsgerichtliche Wahlrechtsentscheidungen schmerzlich vermissen lassen, würde die Stellung des Wählers aufwerten und den inneren Zusammenhalt des Wahlrechts festigen. ■

__Friedrich Pukelsheim__ ist Professor für Mathematik und Inhaber des Lehrstuhls für Stochastik und ihre Anwendungen an der Universität Augsburg.



Windkraftwerke

Sägen, Pumpen, Mahlwerke und andere Maschinen wurden im Mittelalter von Wind und Wasser angetrieben – Mühlen waren High Tech. Noch Mitte des 19. Jahrhunderts drehten sich bis zu 200 000 Windmühlen in Europa, gegen die wirtschaftlichere Dampfmaschine vermochte sich diese Technik aber nicht zu behaupten.

Erst die Ölkrise in den 1970er Jahren entfachte erneut das Interesse an der Windkraft. Eine Kombination von Rotor und Generator sollte die Bewegungsenergie des Windes in elektrischen Strom umwandeln.

Die Entwicklung begann allerdings mit einem Flop: Growian (Große Windenergie-Anlage) sollte alle bisherigen Windkraftwerke übertreffen. Sein Turm ragte 96 Meter in den Himmel; die Spannweite der beiden Rotorflügel betrug zusammen 100 Meter. Bei Windstärke 6 oder einer Windgeschwindigkeit von zwölf Meter pro Sekunde erzeugte die Anlage eine Leistung von einem, bei voller Auslastung von drei Megawatt. Doch von der Aufnahme der Erprobung Ende Januar 1983 bis zum Ende im Sommer 1987 stand Growian auf Grund technischer Probleme zu 99 Prozent der Zeit still.

An seine Stelle traten kleinere, zu „Windparks" angeordnete Kraftwerke, die sich als weit weniger störanfällig und vor allem wirtschaftlicher erwiesen haben. Dank optimierter Rotorblätter und moderner Regelelektronik erzeugen Windräder heute im Durchschnitt 30 Prozent mehr elektrische Leistung als noch vor einem Jahrzehnt. Gesetzliche Bestimmungen wie das seit 1991 in Deutschland geltende Stromeinspeisungsgesetz und das Anfang 2000 beschlossene „Erneuerbare-Energien-Gesetz" haben diese Entwicklung maßgeblich begünstigt, auch wenn Energiekonzerne über die ihrer Ansicht nach zu hohen Vergütungssätze für die Einspeisung des derart erzeugten Stroms klagen. Zurzeit gibt es in Europa den größten Windmarkt der Welt; allein in Deutschland decken die Anlagen drei Prozent des Nettostrombedarfs.

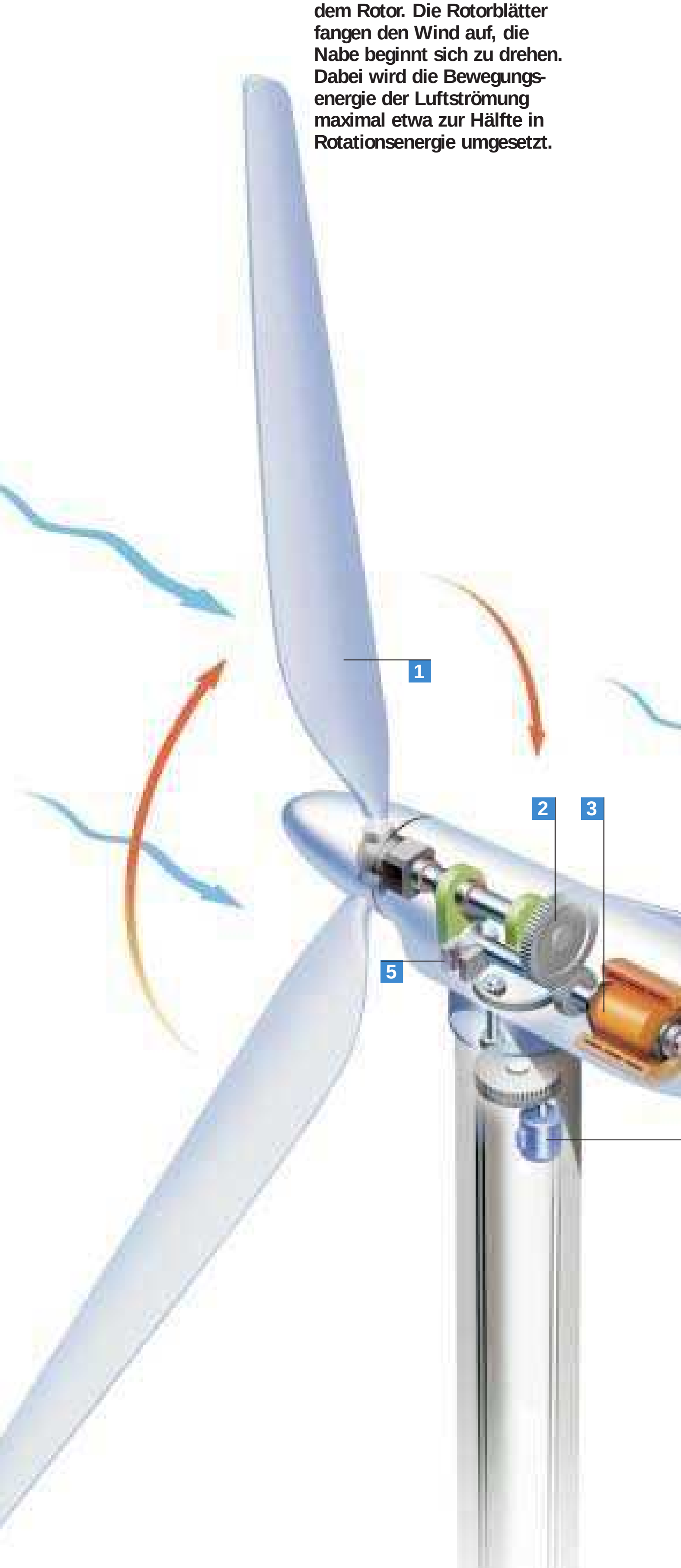
Allerdings empfinden manche die hohen Türme als unästhetisch, Anwohner haben sich in der Vergangenheit über Rotorgeräusche, das Schattenspiel der Drehflügel oder Störungen des Fernsehempfangs beklagt. Die technische Entwicklung versucht diese Probleme zu lösen, beispielsweise durch den Ersatz metallischer Komponenten durch solche aus Verbundwerkstoffen. Zudem durchlaufen Windkraftanlagen die üblichen Genehmigungsverfahren.

Grenzen setzt allerdings auch das Zusammenspiel von Natur und Ökonomie: Nur bei kontinuierlich starken Winden – in Deutschland also vor allem nahe der Küste – wird der Betrieb wirtschaftlich. Doch wenn der „Energielieferant" im Tagesverlauf deutlich variiert, müssen die Betreiber der regionalen Netze Strom zukaufen, und der ist oft teuer. Gerade Spitzen im Stromverbrauch lassen sich nicht wie bei konventionellen Kraftwerken durch ein kurzfristiges „Hochfahren" der Anlage ausgleichen.

Auch hier suchen die Ingenieure nach Lösungen. So könnte ein Stromüberschuss aus Windkraftanlagen zur Wasserstoffherstellung genutzt werden, den Brennstoffzellen später bei Bedarf wieder verstromen.

Stephan Fichtner

Der Autor ist Redakteur im Verlag Spektrum der Wissenschaft.

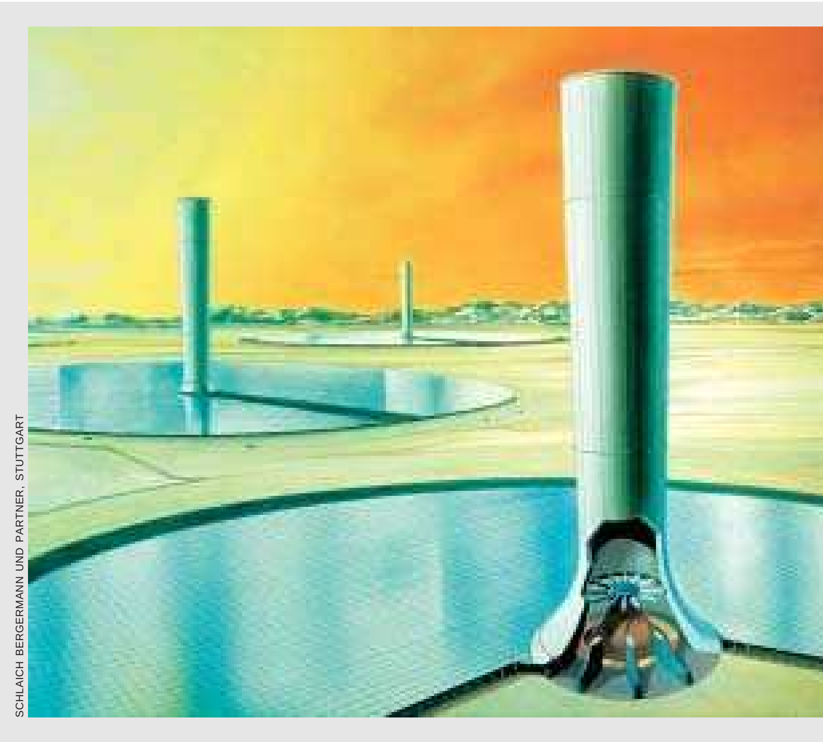


Der Turm einer Windkraftanlage trägt die Gondel mit dem Rotor. Die Rotorblätter fangen den Wind auf, die Nabe beginnt sich zu drehen. Dabei wird die Bewegungsenergie der Luftströmung maximal etwa zur Hälfte in Rotationsenergie umgesetzt.

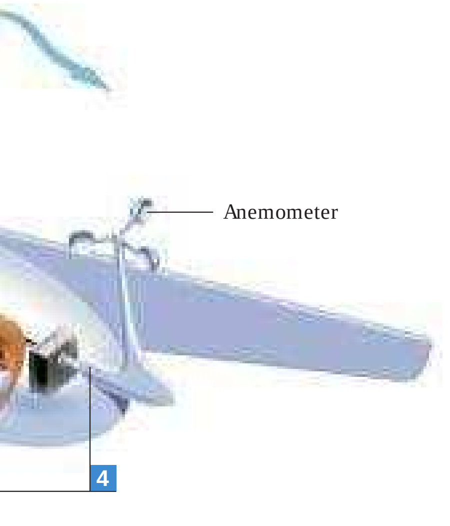
Wussten Sie schon … ?

➤ Einen **Windpark** zu errichten ist eine teure Angelegenheit. Beispielsweise müssen die Rotoren sehr stabil ausgelegt werden, um bei Starkwind nicht gegen den Turm zu schlagen. Das Unternehmen Rocky Flats aus Colorado (USA) propagiert nun, die Rotorblätter hinter den Turm zu hängen und ihnen in gewissem Grade Flexibilität zu geben. Das erlaube, 40 Prozent an Gewicht und damit bis zu 25 Prozent an Investitionskosten zu sparen.

➤ **Aufwindkraftwerke** machen sich ihren Wind selbst: Die Sonne erwärmt Luft unter einem Glasdach, die dann durch eine Kaminröhre aufwärts strömt und Turbinen antreibt (Bild rechts). Die für wüstenhafte Regionen entwickelte Technik ist umstritten. Bei einem in den 1980er Jahren betriebenen Versuchskraftwerk in Manzanares (Spanien) wurden im Mittel knapp 0,1 Prozent der einfallenden Strahlungsleistung in elektrische Energie umgewandelt. Ein Stuttgarter Ingenieurbüro plant nun mit einem australischen Unternehmen zusammen die Errichtung eines Aufwindkraftwerks im Südosten Australiens. War der Kamin in Manzanares noch 200 Meter hoch, soll dort ein fünfmal höherer entstehen. Das Glasdach von vier Kilometer Durchmesser wird etwa fünf Meter über dem Boden liegen, die Anlage soll 200 Megawatt elektrische Leistung erzeugen.



SCHLAICH BERGERMANN UND PARTNER, STUTTGART



1 Um die Leistungsaufnahme zu optimieren, bei starkem Wind aber zu begrenzen, wird der Winkel der Blätter zum Wind geregelt. In letzterem Fall dreht die Elektronik sie ganz „aus dem Wind“ oder stellt sie so, dass die Luftströmung abreißt und bremsende Luftwirbel entstehen.

2 Die Nabe geht in eine Antriebswelle über, die sich 30- bis 50-mal pro Minute dreht. Ein mehrstufiges Getriebe macht daraus 7500 Umdrehungen pro Minute.

3 Die meist vierpoligen Generatoren wandeln die Rotation in Elektrizität um. Dazu dreht sich in ihrem Innern eine Spule, die ein Magnetfeld erzeugt. Dessen Bewegung induziert in den umliegenden Spulen einen Strom.

4 Eine elektronische Steuerung richtet den Rotor über ein Drehgetriebe möglichst optimal zum Wind aus. Dazu misst ein Anemometer dessen Geschwindigkeit.

5 Bei zu starkem Wind oder zur Wartung der Anlage stoppt eine Bremse den Rotor.



Bei frühen Formen der Windmühlen verwendete man Segel oder hölzerne Ruder, die auf vertikalen Achsen saßen. Schon im Mittelalter allerdings hatten sich Mühlen mit horizontaler Achse weitgehend durchgesetzt.

ZEICHNUNGEN: GEORGE RETSECK / QUELLE: U.S. NATIONAL WIND TECHNOLOGY CENTER

Inhalt

Duftstoff vom Chip 80
Die Stempelmacher 82
Gemeinsam stark 84
Paket denkt mit 85
Biochips auf Schnipseljagd 88
Die Alleskönner 90

Die Fabrik auf dem Chip

Als Hoffnungsträger von Hochtechnologie wurde die Mikrosystemtechnik vor Jahren bejubelt. Dann schien sie der Vergangenheit anzugehören, von der Nanotechnik überrollt. Doch nun sind aus Ideen praktikable Techniken und marktfähige Produkte geworden, prinzipielle Probleme scheinen gelöst.

MINIATURISIERTE FERTIGUNG

Chemieanlage aus Silizium

Ganze Chemie- und Pharmafabriken sollen bald auf einem Labortisch Platz finden: Dank Mikrotechnik werden Rohre und Kessel zu haarfeinen Kanälen und winzigen Mischern.

Von Norbert Aschenbrenner

Früher füllte ein Computer eine ganze Halle, heute passt er in die Westentasche. Eine ähnliche Entwicklung dürfte sich in der chemischen Industrie wiederholen – zwar nicht für die gesamte Produktion, doch gehen Experten davon aus, dass viele Grund- und Feinchemikalien in einigen Jahren in miniaturisierten Anlagen produziert werden: Mikrometergroße Mischer und Reaktionskammern sollen einmal dicke Rohre und Rührkessel ersetzen. Solche Miniaturfabriken ließen sich aus handlichen, modularen Einheiten aufbauen, könnten also auch schnell neu konfiguriert werden. Heute dauert der Umbau einer Anlage noch mehrere Stunden. In einer Minifabrik wären Reaktor und Chemikalienzuführung mit einem Handgriff auszutauschen, die Produktion liefe nach wenigen Minuten weiter.

Eine Reihe weiterer Vorteile versprechen die Fabriken im Chipformat. So lässt sich Reaktionswärme aus Mikroreaktoren leichter ableiten, da ihr Volumen klein, ihre Oberfläche aber in der Relation sehr groß ist. Vor allem aber: Die Ausbeute des gewünschten Produkts dürfte meist höher sein, Nebenprodukte fallen vermutlich wesentlich weniger an. Denn Reaktionsbedingungen wie Druck und Temperatur sind in diesem Maßstab sehr viel exakter einzustellen, die Ausgangsstoffe vermischen sich extrem rasch, der Prozess ist insgesamt besser zu steuern.

„Vor allem Hersteller von Spezialchemikalien signalisieren Interesse“, verrät Professor Wolfgang Ehrfeld, langjähriger Leiter des Instituts für Mikrotechnik in Mainz (IMM) und inzwischen im Vorstand der Ehrfeld Mikrotechnik. Er präsentierte auf der diesjährigen Hannover-Messe ein Gerät zur Herstellung von Duftstoffen, das Grundoperationen der Verfahrenstechnik beherrschte: Mischen, Wärmetauschen, Trennen und Extrahieren. Ein Komplettsystem soll demnächst auf den Markt kommen und je nach Ausstattung einen fünf- oder sechsstelligen Eurobetrag kosten.

Deutschland ist in der Mikrotechnik zurzeit weltweit führend. Unternehmen, Institute und Universitäten haben eine Vielzahl von Mischern und Wärmetauschern mit Kanälen von 3 bis 300 Mikrometern aus verschiedensten Materialien wie Silizium, Stahl, Glas oder Keramik entwickelt. So laufen beim Chemieunternehmen Merck seit August 1998 mehrere Mikroreaktoren für die Produktion einer Feinchemikalie. Derzeit setzt die Darmstädter Firma diese Technik unter anderem bei der Herstellung von Flüssigkristallen für LCD-Bildschirme ein. Das Interesse an der neuen Technologie ist groß, da flexible Produktion bei Merck zum Alltag gehört: Von mehr als zwei Dritteln der über 10 000 verschiedenen Produkte werden weniger als zehn Kilogramm pro Jahr hergestellt.

Die BASF hat gleichfalls Interesse signalisiert und erprobte mit Mikroreaktoren etwa die Umwandlung von Alkohol zu einem Aldehyd durch Wasserstoffentzug. Solche Moleküle werden oft in Duftstoffen verwendet. Die Erfahrungen halfen, Prozesse im Großmaßstab zu optimieren. Der Konzern will selbst keine Mikroreaktoren bauen. „Aber wir verfolgen sehr aufmerksam vor allem solche Entwicklungen, die hohe Mengendurchsätze ermöglichen“, sagt Ralf Böhling, der Leiter des Kinetiklabors in der Verfahrenstechnik.

Einige Fachleute warnen, dass die winzigen Kanäle und Zuführungen der Reaktoren keine Feststoffe zulassen – sie würden sofort verstopfen. Doch dieses Problem lässt sich umgehen, indem Chemikalien in gelöster Form verwendet werden. Im kontinuierlichen Betrieb können dann etwa durch einen würfelförmigen Reaktor mit drei Zentimeter Kantenlänge des Forschungszentrums Karlsruhe 7000 Liter pro Stunde gepumpt werden – im Jahr sind das 60 000 Tonnen. Und wenn mehr gebraucht wird, lässt man einfach mehrere solcher Systeme parallel laufen.

Mitunter genügen aber auch kleinste Mengen. Brennstoffzellen verbrauchen Wasserstoff. Statt diesen energieaufwen-

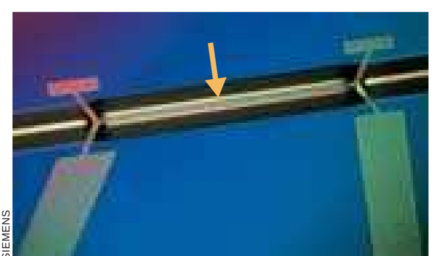
dig aus Wasser herzustellen, bauen die Entwickler einen so genannten Reformer in den Prozessablauf ein, der das begehrte Gas aus Methanol gewinnt. Das IMM hat diesen Schritt miniaturisiert. Ihr Reformer besteht aus Edelstahl und hat 300 Mikrometer dünne Kanäle. Eine Beschichtung aus Zinkoxid und Kupferoxid wirkt als Katalysator und setzt bei 280 Grad Celsius ein Gemisch aus Methanol und Wasserdampf in Wasserstoff und Kohlendioxid um. Bei einem Reformervolumen von nur acht Kubikzentimetern erzeugt das Gerät Brennstoff für eine Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle mit 30 Watt Leistung.

Ein Nachteil der meisten heute existierenden Mikroreaktorsysteme ist, dass sie bislang nur für spezielle Prozesse gebaut wurden und nicht mit anderen Systemen kompatibel sind. Außerdem können sie nicht vollautomatisch betrieben werden. Neben der Ehrfeld Mikrotechnik arbeitet daher auch die Automatisierungssparte (A&D) von Siemens an einem integrierten Ansatz. Mit Merck, dem Anlagenbauer Siemens Axiva, dem Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) in Pfinztal bei Karlsruhe und unternehmenseigenen Forschern in Berlin arbeitet A&D in einem Förderungsprojekt des Bundesforschungsministeriums (BMBF), das Mikroreaktionssysteme reif für die industrielle Praxis machen soll. Der Clou des Systems ist die Vernetzung des Chemikalienflusses mit der elektronischen Steuerung.

„Das System soll bis Mitte 2003 gebaut werden und eine modulare Mikrofluidik für die Versorgung mit Ausgangsstoffen, für die Produktaufbereitung sowie für Sensorik, Analytik und Prozessleittechnik enthalten", erklärt Astrid Lohf, die das Projekt bei A&D betreut. Die Abmessungen werden so gewählt, dass es für die Verfahrensentwicklung und die kontinuierliche Produktion geeignet ist. Die Partner wollen dabei die Einführung der Nitrogruppe (-NO_2) in organische Verbindungen, die Nitrierung, untersuchen: eine wichtige Reaktion in der Chemie, da diese funktionelle Gruppe leicht in andere Gruppen umgewandelt werden kann. Nitrierungen verlaufen oft unter großer Wärmeentwicklung und unspezifisch. Sie eignen sich daher sehr gut als Testfall für die Mikroreaktionstechnik im Industrieumfeld.

Um einen chemischen Prozess exakt zu regeln, müssen Druck, Temperatur, Massenfluss und auch die Dichte des Gemisches stets bekannt sein. Herkömmliche Sensoren sind zu groß für die Minianlagen, und die bisher verwendeten Mikrodrucksensoren haben Ritzen, in denen Chemikalien haften bleiben können. Siemens-Forscher in Berlin bauten daher einen kombinierten Druck-Temperatur-Sensor aus Silizium. Darin fließen die Stoffe an einer Membran vorbei, die den Druck über einen Stempel an eine elektrisch leitende Struktur weitergibt. Deren Widerstand verändert sich und dient als Maß für den Druck. Hinter der Membran befindet sich zusätzlich ein Thermosensor.


SIEMENS


SIEMENS


IMM

Minisensoren und -anlagenkomponenten sollen den Chemiebetrieb westentaschenfähig machen. Gerade mal 1 bis 1,5 Millimeter Durchmesser hat zum Beispiel die runde Fläche, die Druck an eine Membran weitergibt (oben, im Größenvergleich eine Ameise). Etwa 200-mal so dünn wie ein menschliches Haar ist der Golddraht im mittleren Bild (Pfeil). Sein elektrischer Widerstand ändert sich, wenn vorbeiströmende Gase Wärme aufnehmen. Auf diese Weise vermag der Sensor deren Wärmeleitfähigkeit zu messen. Eine ganze Minichemieanlage zeigt hingegen das dritte Beispiel (unten): Der Miniatur-Reformer entnimmt einem maximal einen halben Liter umfassenden Tank flüssiges Methanol und gewinnt daraus Wasserstoff. Eine Brennstoffzelle erzeugt damit eine Leistung von 30 Watt.

Darüber hinaus ist es den Wissenschaftlern gelungen, den wohl weltweit kleinsten Sensor für Wärmeleitfähigkeit zu bauen. Dessen Messkammer ist einen Millimeter lang und enthält einen 0,3 Mikrometer dicken Golddraht – 200-mal so dünn wie ein Haar. Ändert sich seine Temperatur, variiert auch sein elektrischer Widerstand. Wird der erhitzte Draht nun von einem Medium umströmt, ergibt sich aus der Widerstandsänderung die Fähigkeit dieses Mediums, Wärme abzuleiten. Der Sensor eignet sich beispielsweise zur Analyse von Gasgemischen. Denn wenn sich deren Zusammensetzung ändert, variiert auch die Wärmeleitfähigkeit. Das Messprinzip ist seit langem bekannt, revolutionär ist indes die extreme Miniaturisierung.

Klassische Anlagenbauer dürften sich noch eine Weile schwer tun, solche Winzlinge ernst zu nehmen. Sie sind schlichtweg andere Dimensionen gewohnt und müssen umdenken. Doch laut einer Studie des IMM wird die große Zeit der Mikroreaktoren schon in drei Jahren beginnen. ■

*Der promovierte Chemiker **Norbert Aschenbrenner** ist Wissenschafts- und Technikjournalist in München.*

HERSTELLUNG

Auf dem Weg in die erste Liga

Wie im Großen sollen auch Mikrosysteme aus Kunststoff den Massenmarkt erobern. Doch die nötigen Fertigungswerkzeuge erfordern ungewohnte Präzision.

Von Bernd Müller

Ein Minizahnrad neben einer Ameise, ein Hubschrauber kaum größer als ein Daumennagel – selbst Technik-Laien kennen diese spektakulären Bilder. Anfang der 1990er Jahre suggerierten sie den baldigen Durchbruch der Mikrosystemtechnik.

Durchbruch bedeutet aber: Serienreife und baldige Massenfertigung. Beides gelang vor allem mit Silizium, doch auch Metall und Kunststoff gewinnen an Boden (siehe Kasten rechts oben). Insbesondere Kunststoff bietet Chancen auf preiswerte Massenprodukte, so die Hoffnung. Neben seiner direkten Bearbeitung mit dem Laser oder durch Trockenätzen haben Ingenieure Verfahren aus der Makrowelt weiterentwickelt. Dazu gehört auch das Heißprägen. Eine „Werkzeug“ genannte Form wird in heißen Kunststoff gepresst; der kühlt ab und wird dann der Maschine entnommen – so entstehen große Stückzahlen im Sekundentakt.

Um dieses Verfahren in der Mikrosystemtechnik einzusetzen, bedarf es freilich hochpräziser Werkzeuge. Die können konventionell durch Bohren, Drehen und Fräsen mit einer Genauigkeit von einigen Mikrometern hergestellt werden. Es gibt jedoch Anwendungen, wo diese Präzision nicht ausreicht. Große Hoffnungen ruhen deshalb auf der Liga-Technik, die vor rund zwanzig Jahren am Forschungszentrum Karlsruhe erfunden wurde.

Liga steht für Lithografie, Galvanoformung und Abformung. Röntgenstrahlen oder UV-Licht übertragen bei diesem Verfahren die Muster einer so genannten Maske in eine Plexiglasschicht, die auf einer Metallplatte sitzt. Die belichteten Gebiete des Kunststoffs werden anschließend weggeätzt. Zurück bleibt eine Form, die als Negativ für einen Stempel dient. Dieser Stempel, das eigentliche Werkzeug für den Fertigungsprozess, wird mittels Galvanik – also durch Abscheiden von Metall – erzeugt. Die Metallstruktur wächst von der metallischen Basisschicht aus in die Öffnungen des Kunststoffs hinein. Am Ende wird der Kunststoff komplett weggeätzt, das Werkzeug bleibt übrig.



FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Ein vorschnelles Versprechen: Bilder wie dieses suggerierten vor einigen Jahren schon die Serienreife in der Mikrotechnik.

Das Liga-Verfahren hat mehrere Vorteile: Durch die kurzwelligen Röntgenstrahlen entstehen Strukturen, die etliche Millimeter tief sein können und dennoch Wandrauigkeiten von nur rund zehn Nanometern aufweisen. Bei herkömmlichen Siliziumbauteilen und bei der direkten Kunststoffbearbeitung ohne Stempelwerkzeug sind sie deutlich größer und liegen im Bereich von einigen Mikrometern.

Auf der anderen Seite dauern die einzelnen Prozeduren bei anspruchsvollen Werkzeugen sehr lange. Das Abscheiden des Metalls kann beispielsweise drei Wochen in Anspruch nehmen, die gesamte Werkzeugherstellung zieht sich bis zu vier Monate hin. Bei der Siliziumtechnik durchläuft ein Wafer sämtliche Prozesse in zwei bis drei Wochen, obwohl die Zahl der Prozessschritte mit über 200 etwa doppelt so hoch ist wie bei Liga.

Stempel gut, alles gut

Dass sich Liga bisher gegen die Siliziumtechnik nur in Nischenmärkten durchsetzen konnte, hat gleich mehrere Gründe. Einer ist das notwendige intensive Röntgenlicht, das es nur an Quellen so genannter Synchrotronstrahlung wie Anka in Karlsruhe, Bessy II in Berlin oder Elas in Bonn gibt. Anka, eine gerade fertig gestellte und für Liga optimierte Anlage, war mit Investitionskosten von rund 35 Millionen Euro noch eine der billigeren. Firmen, die mit Liga fertigen wollen, können zwar künftig mit Kosten von 200 Euro pro Stunde Strahlzeit rechnen, weil die Forschungsinstitute ihre Türen zunehmend auch für Unternehmen öffnen. Doch die Abhängigkeit von den disen Instituten in Berlin oder Karlsruhe ist für viele Unternehmen ein Hemmnis.

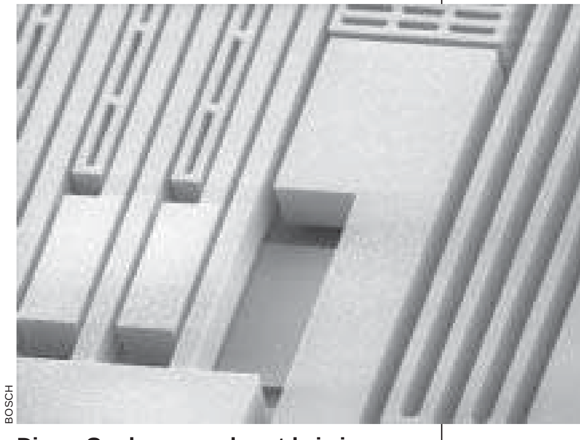
Entscheidend für den Erfolg dieses Verfahrens sind geeignete Produkte und Märkte, nicht die technische Perfektion. So gelang es dem Forschungszentrum Karlsruhe zwar vor Jahren, einen Beschleunigungssensor für Automobile zu entwickeln, der dem Silizium-Pendant in nichts nachstand – doch zu einem indiskutablen Preis. Walter Bacher, der stellvertretende Leiter des dortigen Instituts für Mikrostrukturtechnik, sieht aber Potenzial für Verbesserungen. Derzeit sei bestenfalls jedes zweite Stempelwerkzeug verwendbar. Wenn es gelänge, die Ausbeute von Liga auf siebzig Prozent zu steigern, ließe sich bereits eine kontinuierliche Massenfertigung von Endprodukten unterhalten, denn der einzelne Stempel halte sehr lange. Raum für Verbesserungen gäbe es auch beim Einsatz der Stempel in der Fertigung. Zwar liegt die Ausbeute der Kunststoffabformung

Mikrosysteme im Alltag

Silizium ist Trumpf in der Mikrosystemtechnik, denn daraus lassen sich Bauelemente auf denselben Geräten fertigen, die auch Mikrochips herstellen. Druckköpfe für Tintenstrahldrucker gehören dazu, vor allem aber Elektronik und mechanische Komponenten für die Automobiltechnik.

Beispielsweise produziert der Reutlinger Automobilzulieferer Bosch pro Jahr mehr als 50 Millionen Mikrosensoren für Fahrzeuge, darunter den bekannten Crashsensor, der Airbags auslöst. Das Unternehmen ist überdies Partner im Förderprogramm Europractice der Europäischen Union: Weil sich kleine und mittelständische Unternehmen ein eigenes Engagement in der Mikrosystemtechnik oft nicht leisten können, werden sie im Rahmen des Programms von größeren Firmen bei der Entwicklung und Produktion unterstützt. So stellt Bosch etwa Fertigungszeit auf seinen Maschinen zur Verfügung. Dazu haben die Schwaben Verfahren entwickelt, um auf Silizium-Wafern bis zu 16 unterschiedliche Bauteile verschiedener Hersteller gleichzeitig zu produzieren. Die Partner zahlen eine einmalige Pauschale von 5000 Euro, jedes Mikrobauteil schlägt mit 10 Euro zu Buche. Gefertigt werden vor allem Drehratensensoren wie für Bildstabilisatoren in Videokameras.

Silizium ist mittlerweile nicht mehr die alleinige Basis der Mikrosystemtechnik. Auch Kunststoffe und Metalle kommen zum Einsatz – unter anderem bei Schreib-/Leseköpfen von Computerfestplatten, Abtastlasern von CD-Spielern, Mikroantrieben in Videokameras oder Herzschrittmachern.


BOSCH

Dieser Crashsensor erkennt bei einem Aufprall die Verzögerung des Fahrzeugs: Die Bewegungen der Siliziumzungen gegeneinander ändern seine elektrischen Eigenschaften.

bei über neunzig Prozent, Siliziumverfahren schaffen aber noch einige Prozentpunkte mehr.

Eine große Chance hat Liga in der Mikrooptik, wenn *Fiber-to-Home* Realität wird, also Telefon und Internetdaten via Glasfaser bis in die Wohnung gelangen (Spektrum der Wissenschaft 06/2001, S. 80). Vorrichtungen, die Glasfasern und andere optische Komponenten auf weniger als einen Mikrometer genau positionieren, vermag nur die Liga-Technik zu fertigen.

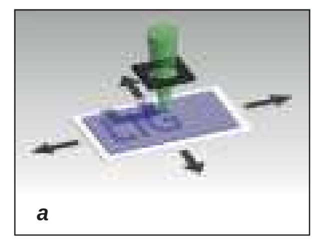
Einen weiteren Massenmarkt für Mikrokomponenten aus Kunststoff verheißen Experten für die Biotechnologie. Billige Plastikchips, die eine schnelle Analyse von Körperflüssigkeiten ermöglichen, implantierbare Systeme zur gleichzeitigen Diagnose von Körperfunktionen und Dosierung von Medikamenten – Ideen gibt es genug, und Liga-Stempel wären mit im Spiel.

Wie in der Mikroelektronik oder der siliziumbasierten Mikrofertigung muss auch hier die Produktion langfristig automatisiert werden. Dennoch wird keine Mikrofertigung – egal ob Silizium oder nicht Silizium – ganz ohne Personal auskommen. Schon jetzt zeichnet sich ein Mangel an qualifizierten Leuten ab. Das trifft für die gesamte Sparte zu, die nach internationalen Marktprognosen mit Umsatzzuwächsen in der Größenordnung von zwanzig Prozent pro Jahr rechnen kann und für die im Jahr 2002 ein Gesamtumsatz von 38 Milliarden Dollar erwartet wird.

Um den Fachkräftemangel zu lindern, wird seit 1998 die Ausbildung zum Mikrotechnologen angeboten, von manchen optimistisch als „Ingenieur light" bezeichnet. Mehr als 200 Auszubildende pro Jahr absolvieren bundesweit diesen Lehrberuf, den unter anderem das Forschungszentrum Karlsruhe, die Unternehmen Bosch und Siemens, das Institut für Mikrotechnik Mainz, etliche Fraunhofer-Institute und Universitäten anbieten. Sollten die Wirtschaftsauguren Recht behalten und die Branche boomt, dürfte selbst das nicht reichen. ■

Der Physiker **Bernd Müller** *ist Wissenschaftsjournalist in Esslingen mit den Schwerpunkten IT- und Technik.*

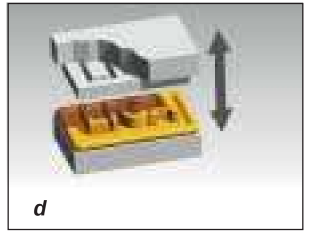
So funktioniert Liga


a



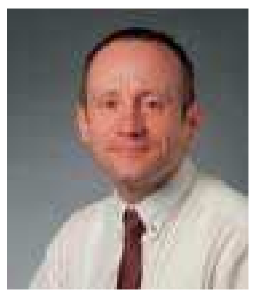
b

c


d

Präzise Stempel für die Mikroformung fertigt das Karlsruher Liga-Verfahren mit harter, hochparalleler Röntgenstrahlung. Zunächst entsteht eine Zwischenmaske (*a*). Dazu strukturiert ein Elektronenstrahl (grün) einen etwa 3,5 Mikrometer dicken Fotolack (Resist, lila); Träger ist eine Titanfolie (weiß). „Belichtete" Partien werden „entwickelt", die Vertiefungen galvanisch mit Gold gefüllt, der verbliebene Fotolack entfernt. Der Röntgenkontrast zwischen Gold und Titanfolie reicht aber noch nicht aus, um dickere Resistschichten zu strukturieren. Deshalb wird nun die eigentliche Arbeitsmaske angelegt (*b*): Röntgenlicht fällt durch die Zwischenmaske auf ein etwa 50 Mikrometer starkes Resist. Das Gold absorbiert die Strahlung. Auch diese Struktur wird entwickelt, Gold füllt die etwa 30 Mikrometer hohen Vertiefungen. Nun lässt sich auch eine 340 Mikrometer starke Resistfolie auf einem Kupferträger durch Röntgenlicht strukturieren (*c*). Nach dem Entwickeln werden Vertiefungen mit Nickel gefüllt, die so entstandene Nickel-Platte wird vom Kupfer getrennt. Bis auf Nachbearbeitungen ist der Stempel fertig, um Kunststoff im Vakuum heiß zu prägen (*d*).

ARNDT LAST, MIKROSPEKTROMETER, HERSTELLUNG IM LIGA-VERFAHREN, PHYSIK IN UNSERER ZEIT 33/2002, NR.2



Der promovierte Maschinenbau-Ingenieur Ulrich Gengenbach initiierte den Verbund MikroWebFab.

INTERVIEW

„Entweder bekommen alle einen Auftrag oder eben keiner“

Im virtuellen Unternehmen MikroWebFab bündeln das Forschungszentrum Karlsruhe und elf Firmen Know-how und Fertigungskapazitäten. Ein Gespräch mit dem Projektleiter Dr. Ulrich Gengenbach vom Forschungszentrum Karlsruhe.

Spektrum: Warum fällt es kleinen und mittleren Unternehmen so schwer, in die Mikrosystemtechnik einzusteigen?

Dr. Ulrich Gengenbach: Firmen dieser Größenordnung sind meist Spezialisten. Sie beherrschen einige wenige Fertigungsprozesse der Mikrotechnik, es fehlt ihnen aber an Know-how, technischer Ausstattung und natürlich auch an Personal, um die ganze Bandbreite abzudecken. Allein um etwa einen Mikrosensor zu fertigen, müssen sie Dünnschichten strukturieren, das Sensorelement auf einer Auswerteschaltung montieren, kontaktieren und schließlich das Ganze in ein Gehäuse verpacken. Die große Palette haben nur wenige Großkonzerne im Angebot, und die bekommen dann häufig die lukrativen Aufträge.

Spektrum: Das ist für Mittelständler bedauerlich, denn schon 2005 sollen weltweit rund 68 Milliarden US-Dollar in diesem Marktsegment umgesetzt werden.

Gengenbach: Wenn sich mittelständische Firmen zu einem Netzwerk zusammenschließen und so lückenlose Prozessketten erreichen, dann werden auch sie ein großes Stück vom Kuchen bekommen. Ein solcher Verbund kann seinen Kunden eine Rundum-Betreuung für Entwicklung, Fertigung und Service anbieten.

Spektrum: Da gibt es nur einen Haken: Viele Köche ...

Gengenbach: Ein derartiges virtuelles Unternehmen benötigt natürlich eine Art Firmenzentrale zur Koordinierung. Die Auftraggeber akzeptieren auch nur selten mehrere Ansprechpartner. Deshalb tritt während der Projektlaufzeit des Verbundes MikroWebFab das Forschungszentrum Karlsruhe als Koordinationsstelle und Generalunternehmer auf.

Spektrum: Das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert Ihr Projekt mit rund zwei Millionen Euro. Welche Fragen sollen Sie lösen?

Gengenbach: Vor allem eine: Welche Produktionstechnik, EDV und Organisation müssen bei den Partnern eines solchen Verbundes installiert werden, damit der Zusammenschluss funktioniert? Die Ergebnisse fassen wir in einem Handbuch für virtuelle Unternehmen zusammen. Das BMBF erwartet auch, dass unser Netzwerk bis Ende April 2004 anhand zweier Referenzprodukte die möglichen Probleme aufdeckt und Lösungen entwickelt.

Spektrum: Welche Produkte sind damit gemeint?

Gengenbach: Ein Mikrosensor, der Magnetfelder misst; hier befinden wir uns noch in der Entwicklungsphase. Das zweite Projekt ist die BioDisk, ein System zur Laboranalyse biologischer Flüssigkeiten. Eines der Unternehmen im Netzwerk, die i-sys Automationstechnik, fertigt bereits erste Prototypen davon.

Spektrum: Wie sind denn die Aufgaben unter den elf Firmen verteilt?

Gengenbach: Es gibt zwei Referenzkunden, die Produktideen, Know-how und Patente einbringen. Fünf Technologiefirmen bringen die Produkte zur Fertigungsreife und stellen sie her. Darüber hinaus erarbeiten sie die grundlegenden Methoden, wie sich im Verbund komplexe Mikrokomponenten realisieren lassen. Vier weitere Firmen sowie das Forschungszentrum Karlsruhe schaffen als Serviceteam die erforderliche Infrastruktur, also Informations- und Kommunikationstechnik, Logistik, rechtliche Grundlagen und so weiter. Das Forschungszentrum Karlsruhe koordiniert zudem und wertet aus.



FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Die BioDisk ist das erste von der MikroWebFab entwickelte und gefertigte Bauteil. Eine zu untersuchende Flüssigkeit, etwa ein Blutstropfen, wird in die Zentralkammer gegeben und über feinste Kapillaren automatisch in die 32 Außenkammern transportiert. Reagenzien darin ermöglichen 32 Analysen gleichzeitig.

Spektrum: Die Firmen sitzen ja nicht alle am selben Ort. Wie funktioniert die Zusammenarbeit in der Praxis?

Gengenbach: Kommunikation, Wissensmanagement und Auftragsabwicklung erfolgen vor allem via Internet. Dazu installieren wir am Forschungszentrum zentrale Serverdienste, auf die die Projektpartner jederzeit zugreifen können. Dabei verwenden wir natürlich nur international standardisierte Datenformate. Zusätzlich finden regelmäßig Projekttreffen statt. Die Mikrokomponenten selbst werden in der Fertigungsphase von Kurierdiensten zwischen den einzelnen Partnern in Reinraum-Transportbehältern hin- und hertransportiert.

Spektrum: Doch jede Firma hat ihre eigene Kultur, eigene Geschäftsinteressen. Gibt es da nicht eine Menge Reibung?

Gengenbach: In der Tat ist es nicht einfach, alle an den runden Tisch zu bekommen. Aber letztlich geht es darum, einen Auftrag gemeinsam zu erhalten oder alleine eben keinen. Das fördert die Bereitschaft zur Kooperation.

Spektrum: Bei so vielen Partnern dauern Abstimmungen vermutlich recht lang?

Gengenbach: Nein. Eines der Ziele besteht ja darin, die Rahmenbedingungen so zu gestalten, dass eine effiziente Zusammenarbeit möglich wird. Deshalb optimiert das Serviceteam Schnittstellen mit Hilfe moderner Software-Werkzeuge, beispielsweise Systeme für die firmenübergreifende Produktionssteuerung oder Vertriebsunterstützung. Während Prozesse wie Entwicklung, Produktion und Vertrieb bei einer einzelnen Firma durchgängig funktionieren, müssen bei einem Verbund wie MikroWebFab standardisierte Abläufe und Kommunikationsschnittstellen geschaffen werden.

Spektrum: Ist geplant, noch weitere Unternehmen in den Verbund aufzunehmen?

Gengenbach: Im laufenden Projekt nicht. Bei Erfolg könnten wir vielleicht gegen Ende des Projekts neue Technologiepartner aufnehmen, aber mehr als zwanzig Mitglieder dürfte ein solcher Verbund nicht verkraften, ohne dass Vertrauen und Kooperation leiden. Zum Projektende soll es auf jeden Fall ein zentrales Koordinationsbüro geben, eventuell sogar eine MikroWebFab GmbH, die dann künftig Aufträge akquiriert und koordiniert sowie Marketingmaßnahmen durchführt. Öffentliche Einrichtungen wie das Forschungszentrum Karlsruhe werden diese Rolle allerdings nicht übernehmen können. ■

*Das Interview führte **Ulrike Zechbauer**, Wissenschafts- und Technikjournalistin in München.*

LOGISTIK

Pakete in der Geisterbahn

In Warenlagern beginnt ein neues Zeitalter: Dank elektronischer Etiketten, Transponder genannt, sollen sich die Produkte in den Lagern selbst organisieren. Ähnliches gilt für Fabriken der Automobilindustrie und Logistikketten aller Art.

Von Bernd Müller

Wie von Zauberhand gelenkt, gleiten Transportboxen über Fließbänder. Im Leipziger Versandzentrum der Firma Quelle geht es zu wie in der Geisterbahn. An automatischen Weichen werden die Kisten zu verschiedenen Packstationen geleitet, an denen nacheinander Socken, Hosen und Röcke hineingelegt werden – bis schließlich ein kompletter Kundenauftrag die Box füllt. All diese Waren holen automatische Fahrstühle aus einem Hochregallager – so hoch wie ein zehnstöckiges Haus (siehe Foto unten). 80000 Artikel sind abrufbar, gelagert in über zwei Millionen Kartons. Bis zu 180000 Sendungen verschickt das Leipziger Zentrum täglich, kaum eines auf den falschen Weg.

Wer denkt, all dies wäre nur von Großrechnern zu leisten, irrt. Ein zentraler Rechner enthält nur das Steuerungsprogramm, die detaillierten Informationen über die einzelnen Aufträge sind an den einzelnen Transportboxen selbst gespeichert. Möglich machen das briefmarkengroße Identifikations-Etiketten auf den Boxen, so genannte Transponder, die dem Steuerungssystem an den Weichen mitteilen, wie der Auftrag aussieht. Entsprechend werden die Transportkisten dann links- oder rechtsherum geleitet, und der Fahrstuhl fährt in die zweite oder zehnte Etage des Hochregallagers. ▶



JULIA KNOP

Das riesige Hochregallager des Versandhändlers Quelle ist eine Welt der Automaten. 35 Meter hoch, fasst es über zwei Millionen Kartons mit Waren. Menschen wären hier überfordert. Deshalb holen automatische Fahrstühle – so genannte Regalstapler – Waren, die von Kunden bestellt wurden.



BEIDE BILDER: JULIA KNOP

Auf langen Fließbändern fahren Transportboxen zu den Packstationen – die Informationen über den jeweiligen Auftrag speichert eine Art elektronisches Etikett im Boden der Box (hier aus der Moby-L-Serie von Siemens).

In den Transpondern ist die Produktinformation auf einem winzigen elektronischen Chip gespeichert. Die Daten werden über eine eingebaute Miniantenne gesendet. Diese Technik hat sich längst in anderen Bereichen bewährt. Seit Anfang der 1990er Jahre sind sie Teil der Wegfahrsperre von Fahrzeugen – im Autoschlüssel untergebracht, senden sie über Meter hinweg einen Erkennungscode und entriegeln so die Zündung.

Manche Transponder überbrücken kürzere Distanzen. Im spanischen Opelwerk Figueruelas sind sie am Transportschlitten der Karosserien befestigt. Lesegeräte an den Fertigungsstationen aktivieren die elektronischen Etiketten aus einer Entfernung von rund zwanzig Zentimetern durch ein schwaches elektrisches Feld. Das wiederum induziert eine Spannung in einer Magnetspule des Transponders, das Gerät wird mit Energie versorgt und kann seine Daten funken – etwa ob das jeweilige Fahrzeug mit Spezialscheinwerfern oder beheizbaren Sitzen bestellt wurde.

Natürlich ließen sich solche Informationen auch in Barcodes unterbringen, wie sie Lebensmittelverpackungen tragen. Transponder haben demgegenüber aber Vorteile. Sie speichern wesentlich mehr Daten, lassen sich ohne Sichtkontakt und aus jedem Winkel ablesen und arbeiten auch verschmutzt oder zerkratzt. „Entscheidend ist aber“, sagt Heinrich Stricker, Leiter der Abteilung Business-Development für die Identifikationssysteme Moby bei Siemens, „dass bestimmte Transponder unbegrenzt wiederbeschreibbar sind.“ Besonders wichtig sei das für die Qualitätssicherung, denn nach jedem Arbeitsschritt lassen sich Kontrolldaten in den elektronischen Etiketten ablegen. So entsteht eine lückenlose Produkthistorie.

Als Warenetiketten im Konsumgüterbereich sind Transponder allerdings wesentlich teuerer als Barcodes. Zwar gibt es inzwischen auch billige, die weniger als einen Euro kosten, für Verpackungen oder Wegwerfartikel aber ist das noch immer zu viel. Forschungsinstitute und Industrieunternehmen arbeiten deshalb daran, die Produktionskosten zu senken. Ihr Ziel ist es, Transponder eines Tages wie Barcodes einfach auf die Verpackung zu drucken – mitsamt Antenne und Mikrochip für etwa einen Cent. Was noch visionär klingt, könnte schon bald Realität werden – mit Hilfe bestimmter Kunststoffmoleküle. Je nach molekularem Aufbau können diese Polymere Strom leiten oder als Isolator wirken: So ist Polyanilin beispielsweise ein recht guter elektrischer Leiter, während etwa Polythiophen oder Polypyrrol den Strom wesentlich schlechter transportieren. Durch Oxidation oder Reduktion der Kunststoffe – also Entfernung oder Hin-

zufügen von Elektronen – lässt sich die Leitfähigkeit in bestimmten Bereichen gezielt manipulieren.

Die Polymere können auch das Verhalten von Halbleitern annehmen, und damit öffnet sich die Welt der mikroelektronischen Schaltungen. Zudem lösen sich diese Kunststoffe in bestimmten Flüssigkeiten, können somit wie Pigmente in Tinte auf Folien aufgedruckt werden. Inzwischen ist es Wissenschaftlern gelungen, erste einfache Schaltkreise zu drucken – die Vorstufe eines Chips.

Mit der Polymertinte werde sich Elektronik wie eine Zeitung drucken lassen, glaubt Wolfgang Clemens von Siemens Corporate Technology. Gemeinsam mit dem Chemieunternehmen Merck und weiteren Forschungsinstituten entwickelt die Erlanger Firma Werkstoffe und Fertigungsmethoden für Polymerchips. Doch bis der erste Prototyp eines Transponders auf Folie gedruckt wird, dürften noch ein paar Jahre vergehen. Unklar ist etwa noch, welche Materialien sich für eine Massenproduktion überhaupt eignen. Zudem müssen die altbewährten Drucktechniken verfeinert werden. Bei einem farbigen Druckbild etwa sind Kanten oft unscharf, weil die einzelnen Rasterpunkte nicht direkt auf einer Linie liegen. Dem menschlichen Auge entgehen solche Ungenauigkeiten. Bei Transistoren müssen aber hauchfeine leitende, halbleitende und isolierende Schichten präzise übereinander liegen.

Gedruckte Elektronik

Um herauszufinden, wie sich Folien großformatig mit Kunststoff-Elektronik beschichten lassen, hat das Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) in München Anfang Juli 2002 das „Anwendungszentrum Rolle zu Rolle“ eröffnet. Die Trägerfolie abrollen, beschichten und die fertigen Chips als Meterware wieder aufrollen, das ist die Vision der Forscher. Dabei verwenden die Münchner beispielsweise Laminiergeräte, die Kunststofffolien unter Hitze miteinander verbinden, und Dispenser, die winzige Polymertropfen mit einer Art Kanüle auftragen.

Forschungsbedarf besteht indes nicht allein bei der Entwicklung preiswerter Transponder. Metallische Gegenstände können den Funkverkehr stören oder das Signal abschirmen. Experten vom Fachgebiet Logistik der Universität Dortmund messen, durch welche Materialien die elektronischen Etiketten problemlos senden und wie schnell sie sich am Lesegerät vorbeibewegen dürfen. Das ist etwa an Zufahrten zu Speditionen von Interesse, wo die Ladung vorbeifahrender Lastwagen in Sekundenschnelle erfasst werden muss.

Neue Systeme sollen Hunderte von Transpondern gleichzeitig abfragen können. Dazu benötigen sie aber weitaus höhere Funkfrequenzen als bislang. Je mehr elektromagnetische Schwingungen pro Sekunde übertragen werden, desto mehr Informationen lassen sich darin verpacken, oder – alternativ – desto mehr Transponder kann die Anlage gleichzeitig auslesen. Ein weiterer Vorteil der höheren Frequenzen: Der Abstand zum Transponder lässt sich dann über mehrere Kilometer hinweg auf bis zu einen Zentimeter genau bestimmen. Mittels mehrerer Lesegeräte sind die Etiketten also punktgenau zu orten. Das ermöglicht die elektronische Überwachung und Verladung zum Beispiel von Neufahrzeugen auf den Parkplätzen der Automobilfabriken. ■

Tim Schröder *hat Biologie und Physik studiert und war Redakteur im Wissenschaftsressort der Berliner Zeitung. Er lebt als freier Autor in Oldenburg.*

PHARMAZEUTIK

Schnipsel-Jagd

Mit Biochips erforschen die Pharmazeuten Krankheitsursachen und prüfen ihre Medikamente. Kurze DNA-Abschnitte auf einem Chip verraten beispielsweise, ob ein Wirkstoff bei einem bestimmten Patienten anschlagen würde.

Von Michael Lang

Gerade acht Jahre auf dem Markt gehören DNA-Chips heute auf den Wunschzettel pharmazeutischer Labors. Analysten des Beratungsunternehmens Frost und Sullivan prophezeien ihren Herstellern Zuwachsraten von 65 Prozent pro Jahr. Wurden vor zwei Jahren auf diesem Markt noch 874 Millionen Dollar umgesetzt, werden es 2004 schon 2,6 Milliarden sein. Die Liste der möglichen Anwendungen ist lang und reicht von der Entwicklung auf den Patienten abgestimmter Medikamente bis hin zur Früherkennung von Erbkrankheiten. So genannte Proteinchips, die nach bestimmten Eiweißen in Gewebeproben forschen, eröffnen der Industrie wie der medizinischen und molekularbiologischen Forschung weitere Möglichkeiten; diese Technik befindet sich allerdings noch in der Entwicklung.

Grundlage der DNA-Chips ist eine wesentliche Eigenschaft der Erbsubstanz, die Komplementarität. Die DNA besteht neben Zuckermolekülen und Phosphatgruppen aus den vier chemischen Bausteinen Adenin, Cytosin, Guanin und Thymin – diese werden gern als Alphabet des Lebens bezeichnet. Die DNA-Bausteine verknüpfen sich zu einer langen Kette. Zwei passende Stränge können darüber hinaus aber auch untereinander eine lockere Bindung über Wasserstoffbrücken eingehen. Allerdings bilden nur Adenin mit Thymin und Cytosin mit Guanin ein Paar. Am besten „paaren sich“ zwei Stränge, wenn sie genau komplementär sind, also jedem A ein T und jedem C ein G gegenübersteht.

Dieses Prinzip hat das amerikanische Unternehmen Affymetrix technisch umgesetzt; die meisten Biochips beruhen auf ihrem Verfahren. Viele kleine charakteristische Erbgutschnipsel – als Sonden bezeichnet – werden dazu wie in einem Schachbrettmuster auf einer planen Unterlage fixiert. Spülen die Biologen eine zu untersuchende Probe über dieses „Mikro-Array“, dann bleiben DNA-Stücke an zu ihnen komplementären Sonden haften. In weiteren Schritten entstehen dort Molekülkomplexe, die unter Fluoreszenzlicht leuchten – die Bestandteile der Probe lassen sich nun identifizieren (SdW 06/2002, Seite 62).

Das Freiburger Unternehmen GeneScan offeriert seit Mai dieses Jahres einen DNA-Chip für die Pharmakogenetik, einen Forschungszweig, der sich mit der individuellen Wirksamkeit und Unverträglichkeit von Arzneimitteln beschäftigt. Oft erzielen Medikamente nicht die gewünschte Wirkung, weil sie von den Enzymen der Leber nicht im richtigen Tempo um- oder abgebaut werden. Erfolgt dieser Vorgang zu schnell, wirkt das Arzneimittel nicht oder nur unzureichend. Bleibt es dagegen zu lange im Gewebe, können toxische Nebenwirkungen auftreten.

Der „Pharm-O-Kin-Chip“ von GeneScan hilft, individuelle Unterschiede im Stoffwechsel auszumachen. Die meisten Arzneimittel werden nämlich zunächst von zwölf Enzymen der Cytochrom-P450-Familie (CYP) oxidiert, die Abbauprodukte dann von N-Acteyltransferasen für den Abtransport an bestimmte Substanzen gekoppelt. Dass diese Enzyme bei jedem Menschen unterschiedlich schnell arbeiten, beruht auf geringfügigen Veränderungen der Erbsubstanz, oft allein auf dem Austausch einer einzelnen Base durch ein anderes, einer so genannten Punktmutation. Insgesamt 39 solcher individuellen genetischen Unterschiede (fachlich Polymorphismen) auf den Genen für verschiedene CYP-Enzyme und auf denen für die N-Acteyltransferase 2 erkennt der GeneScan-Chip.

Kampf dem Krebs

Ein weiterer Anwendungsschwerpunkt von Biochips liegt in der Krebsforschung. Seit zweieinhalb Jahren sind beispielsweise die Pharmaforscher von Roche Diagnostics im bayerischen Penzberg verschiedenen Krebsarten wie etwa Lungenkrebs mit dieser Technik auf der Spur. In so genannten Genexpressionsstudien vergleichen sie die Aktivität von Genen in gesunden Zellen und Krebszellen, insbesondere nach der Einnahme von Therapeutika.

Von den vielleicht 30 000 verschiedenen Genen des Menschen ist stets nur ein kleiner Teil aktiv. Welche es sind, verraten ihre Botenstoffe (mRNA), die zu den Proteinfabriken der Zellen wandern. Auch hier greift die Technik der DNA-Chips: In einem Zwischenschritt erzeugen Enzyme anhand der mRNA eine weitgehend getreue Kopie (cDNA ge-



INFINEON

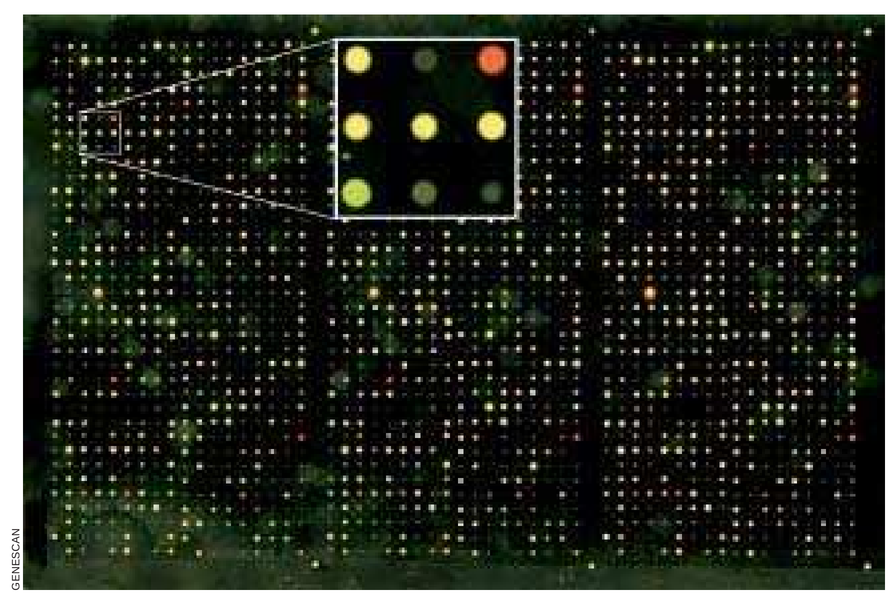
Ein Biochip besteht aus einem Raster von feinen Grübchen in einem Träger, in denen Biomoleküle als Sonden fixiert werden. Das Besondere an diesem Chip von Infineon ist das Trägermaterial: Silizium statt Glas macht es möglich, die Auswerteelektronik zu integrieren.

nannt) der originalen Erbsubstanz (lediglich für die Identifikation nicht benötigte Abschnitte fehlen). Die Intensität des Fluoreszenzlichts ist dann ein Maß für die Aktivität des betreffenden Gens. „Diese Biochips versetzen uns in die Lage, zum Beispiel Lungenkrebs besser zu verstehen. Es gibt nämlich kein einheitliches Krankheitsgeschehen. Je genauer man hinschaut, umso mehr Untergruppen lassen sich definieren“, erklärt Helmut Burtscher von Roche Diagnostics. Bis diese Forschung zu besseren Medikamenten verhilft, werden nach seiner Ansicht aber noch zwei bis fünf Jahre vergehen.

Auch dem Magengeschwür rücken Biochips zu Leibe. Wissenschaftler schätzen, dass rund zwei Drittel der Weltbevölkerung mit dem Bakterium *Heliobacter pylori* infiziert sind. *H. pylori* soll nicht nur für achtzig bis neunzig Prozent aller Magengeschwüre verantwortlich sein, es steht auch im Verdacht, Magenkrebs zu verursachen. Die Firma MWG Biotech AG aus Ebersberg bei München hat nun einen Biochip entwickelt, dessen DNA-Sonden alle 1877 Gene des Bakteriums erfassen. Damit sollen Diagnostik und Therapie einer Infektion verbessert werden. „Mit diesem Chip kann man sehr gut erforschen, welcher Mechanismen sich dieses Bakterium bedient und wie man sie blockieren kann. Beispielsweise muss es die Magensäure neutralisieren, um sich einzunisten, und wir wollen das verhindern“, erklärt Kai Wilkens, Marketing-Manager von MWG Biotech.

Das Unternehmen bietet der Grundlagenforschung auch Biochips mit den Genomen von Maus, Hefe oder *Escherichia coli*, die in der Forschung als „Modellorganismen“ dienen. Auch das vor zwei Jahren entschlüsselte menschliche Erbgut ist bereits Produkt: MWG Biotech hat auf einem DNA-Array die charakteristischen Genschnipsel derjenigen 10000 menschlichen Gene untergebracht, deren Funktion schon exakt bekannt ist. Auf zwei anderen Biochips stehen den Forschern weitere 20000 Gene zur Verfügung.

Das Unternehmen Nanogen aus San Diego (Kalifornien) hat sich auf die Diagnose von Erbkrankheiten spezialisiert. Mit einem neuen Biochip soll etwa die Früherkennung von Mukoviszidose erleichtert werden. Mukoviszidose-Patienten leiden an einer quälenden Verschleimung der Lungen infolge einer Störung der Atmung. Die Krankheit, die auf einen Defekt des Gens CFTR auf Chromosom 7 zurückgeht und unheilbar ist, tritt nur bei Kindern auf, deren Eltern beide diesen Gendefekt tragen. Je früher sie erkannt wird, umso wirksamer lassen sich die auftretenden Symptome mildern.


GENESCAN

Anhand der Fluoreszenz lässt sich ablesen, an welchen Sonden sich DNA-Moleküle aus einer Probe gebunden haben. Die Intensität des Lichts ist sogar ein Maß für die Menge der so identifizierten Moleküle.

„Häufig wird die Krankheit bei den jungen Patienten aber zu spät erkannt, weil sie infolge von Punktmutationen unterschiedlich stark ausgeprägt ist“, erklärt Kieran Gallahue, der Präsident von Nanogen. Der Mukoviszidose-Chip erkennt über 900 davon. Allerdings stellt sich ein moralisches Problem: Nach einer Diagnose entscheiden sich Eltern möglicherweise für eine Abtreibung, um dem Kind die schwere Krankheit zu ersparen.

The Next Generation: Proteinchips

Nanogen entwickelt zudem einen Biochip für den genetischen Fingerabdruck: Anhand von 13 charakteristischen kurzen DNA-Stücken, den so genannten Short-Tandem-Repeats, und der Häufigkeit, mit der sie sich in der Erbsubstanz wiederholen, kann eine Person identifiziert werden. Das Unternehmen will ein mobiles Gerät auf den Markt bringen, mit dem Polizisten bereits auf Streife den genetischen Fingerabdruck ermitteln und per Funk mit den Werten einer zentralen Datenbank vergleichen können. Dazu muss freilich auch die Probenaufbereitung in einem tragbaren Analysegerät integriert werden; derzeit geschieht das im Fachlabor. Gallahue schätzt, dass diese Technik in wenigen Jahren marktreif ist.

Den Weg zu mehr Automatisierung bei Biochips beschreitet auch die Mannheimer Firma Febit. Deren System Geniom One soll auf einfache Weise einen leeren Chip nach den Wünschen des Anwenders bestücken. „Man klickt einfach mit der Computermaus auf die gewünschten DNA-Sonden“, erklärt Markus Beier, „holt sich einen Chip-Rohling aus dem Kühlschrank, setzt ihn in Geniom One ein und startet die Synthese.“ Auch der Münchner Halbleiterhersteller Infineon ist hier aktiv. Während die meisten Biochips mit Glas als Träger arbeiten, verwendet Infineon Silizium, um gleich die elektronische Auswerteeinheit zu integrieren.

Während DNA-Chips langsam „erwachsen“ werden, stecken so genannte Proteinchips noch in den Kinderschuhen. Sie suchen direkt nach bestimmten Aminosäure-Molekülen. Ohne den Umweg über mRNA und cDNA ließe sich damit die Aktivität eines Gens anhand der resultierenden Proteine nachweisen. Diagnostik und Erforschung von Infektionen wären einfacher, da es oft bestimmte Eiweißstoffe oder Peptide sind, die eine Krankheit auslösen. Zu den Pionieren gehört das Unternehmen Ciphergen in Fremont (Kalifornien), dessen Chip das Molekulargewicht eines Proteins bestimmen kann. Doch Thomas Laufen von GeneScan dämpft den Optimismus. „Proteine sind nur in ihrer dreidimensionalen Struktur aktiv, bei der Fixierung auf die Chipoberfläche können sie diese aber verlieren. Und es gibt noch keine Möglichkeit, die biologische Aktivität des Proteins direkt auf dem Chip zu untersuchen.“ ■

Michael Lang *ist promovierter Biologe und arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Ludwigshafen.*



ADVALYTIX

Jürgen Scriba setzt auf einen Mix der Disziplinen im eigenen Haus.

INTERVIEW

„Die Technologien müssen sich noch am Markt bewähren“

Während andere Unternehmen Know-how von außen zukaufen, setzt die Advalytix AG in Brunnthal bei München auf einen Expertenmix im eigenen Hause. Das sei die beste Strategie, meint der Physiker und ehemalige Spiegel-Redakteur Dr. Jürgen Scriba (38), heute Vorstand für Entwicklung und Produktion.

Spektrum: Advalytix beschäftigt Physiker, Maschinenbauer, Biotechnologen und andere Experten. Sie verfügen als Mittelständler sogar über einen eigenen Reinraum. Warum dieser Aufwand?

Dr. Jürgen Scriba: Mikrosystemtechnik erfordert einfach extrem kurze Wege und viel Know-how im eigenen Hause.

Spektrum: Angesichts des allgemeinen Trends in der Industrie, die Fertigungstiefe zu verringern, ist das erstaunlich.

Scriba: Wenn Herr Daimler bei der Konstruktion des ersten Autos schon versucht hätte, die Fertigungstiefe zu verringern, würden wir alle zu Fuß laufen. Das kann man erst machen, wenn ein Industriezweig etabliert ist.

Spektrum: Demnach steht die Mikrosystemtechnik noch am Anfang?

Scriba: In den vergangenen Jahrzehnten entstand ein Kanon hervorragender Technologien, vom Silizium-Ätzen bis zur Liga-Technik. Aber die müssen sich erst noch am Markt bewähren, und das können sie nur in Form von Produkten. Und da steht die Branche wirklich noch am Anfang.

Spektrum: An der Hochschule haben Sie und Ihre Kollegen ein Verfahren entwickelt, durch Oberflächenwellen Flüssigkeitströpfchen auf Biochips zu bewegen. Wie versuchen Sie daraus ein Produkt zu machen?

Scriba: Wir demonstrieren zunächst mit einem Prototypen, dass unsere Idee auch industriell umsetzbar ist. Erst dann suchen wir einen Kooperationspartner, der aus dem Prototypen ein anwenderfreundliches Produkt macht.

Spektrum: Aber den Prototyp machen Sie vollständig im eigenen Hause?

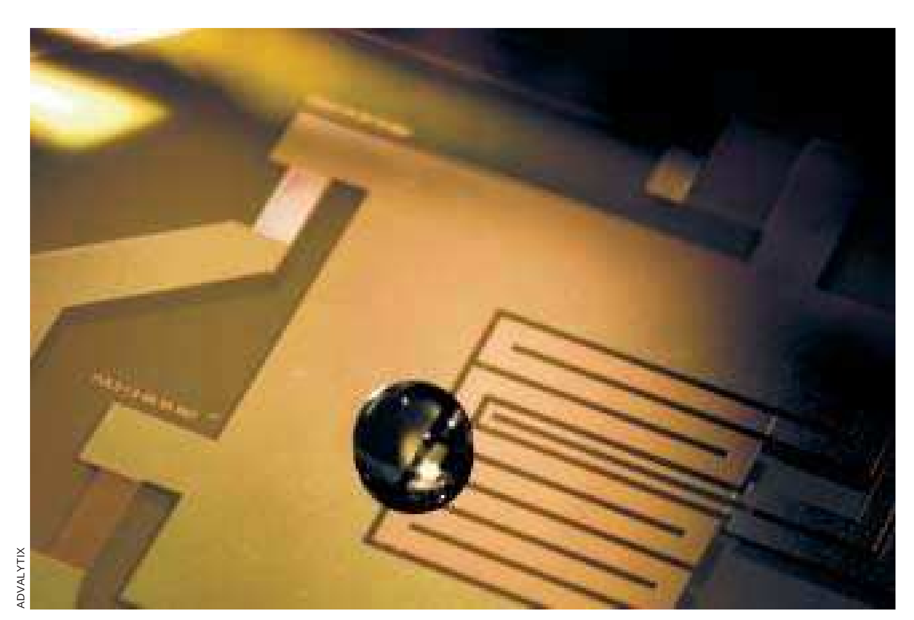
Scriba: Ja, denn nur so geht es. Ich gebe Ihnen ein Beispiel: Unser Chip ist in einen Kunststoffträger eingeklebt. Welcher Kunststoff und welcher Kleber sich dafür am besten eignen, wollten wir zunächst von einer Auftragsfirma herausfinden lassen. Doch dann mussten wir feststellen, dass es Monate dauern würde, die Anforderungen zu definieren. Können zum Beispiel biologische Pufferlösungen den Kleber angreifen? Solche Fragen lassen sich nur in ständigem Austausch der Biologen und Chemiker klären, und nicht in wöchentlichen Treffen mit einer Dienstleisterfirma.

Spektrum: Und in diesem Rahmen benötigen Sie den Reinraum?

Scriba: Richtig, da wir auch den Fertigungsprozess optimieren. Der ist übrigens so konzipiert, dass er sowohl im kleineren Maßstab unseres Reinraums als auch in großen Fabriken funktioniert. Und beim Gesamtsystem bauen wir auf Standards. Nun dürfen Sie aber nicht denken, dass wir gar nicht kooperieren. Wir arbeiten zum Beispiel mit anderen in einem BMBF-geförderten Projekt. Aber auch da muss man erst einmal eine gemeinsame Technologie-Plattform schaffen, um die auftretenden Probleme überhaupt qualifiziert besprechen zu können.

Spektrum: Wären da nicht ausgebildete Mikrosystemtechniker von Nutzen, für die es ja seit einigen Jahren Studiengänge gibt? Sie haben bislang keinen in Ihrem Team. Warum nicht?

Scriba: Dieses Berufsbild ist leider nicht klar definiert. Wir bräuchten ganz andere Mikrosystemtechniker als beispielsweise eine Firma, die optische Mikrospiegel herstellt. Klassisch ausgebildete Biologen, Chemiker, Physiker oder Elektrotechniker mit der Bereitschaft zum fachübergreifenden Austausch eignen sich da viel besser. Aus diesem Grund haben wir einen Elektroniker, der sich auch auf die Feinmechanik versteht, und einen Chemiker, der ein Top-Mann für Biochips ist. Diese Durchlässigkeit ist unsere Stärke. ■



ADVALYTIX

Ein Tropfen DNA-Lösung liegt auf einem Biochip der Firma Advalytix. Durch feine Oberflächenwellen lässt sich der Tropfen gezielt hin- und herbewegen, etwa auf eine Heizstruktur zu (Bildmitte), über die er erwärmt werden kann.

*Das Interview führte **Ulrich Eberl**, promovierter Physiker sowie Wissenschafts- und Technikjournalist in München.*

SGL CARBON

Bremsen im Verbund

Karbonfasern gelten oft als Wunderwerkstoff, denn das Material ist fest und zäh, verträgt hohe Temperaturen und wiegt dabei nicht viel. Doch Bremsscheiben daraus enttäuschen, greifen sie doch erst richtig, wenn sie durch Reibung mindestens 300 Grad Celsius heiß werden. Außerdem verschleißen sie schnell und überzeugen auch nicht bei Regen. Während sich der Formel-1-Pilot mit ein paar Runden zum Warmfahren behelfen kann und sein Boxenteam die abgenutzten Leichtgewichte frühzeitig austauscht, müssen normale Automobilisten bislang auf die schwarzen Scheiben verzichten.

Ein Verbund von Karbonfasern und Keramik soll das nun ändern. Dabei bringt die Keramik Haltbarkeit und ein gutes Bremsvermögen bei niedrigen Temperaturen mit in die Ehe. Die ersten solcher Composite-Bremsscheiben fertigte das Unternehmen SGL Carbon, der weltweit größte Hersteller von Produkten aus Kohlenstoff und Grafit, im vergangenen Jahr noch weitgehend manuell. Vor wenigen Monaten ging nun eine automatisierte Produktionsanlage für jährlich 35000 Scheiben in Betrieb. Hauptabnehmer ist vorerst Porsche, der Aufpreis für seine „Ceramic Composite Brake" beträgt etwa 7500 Euro.

In einem ersten Schritt gewinnen die SGL-Ingenieure Karbonfasern aus Fasern des Kunststoffs Polyacrylnitril. Die werden in zwei Stufen – erst in oxidierender Atmosphäre, dann unter Luftabschluss – erhitzt und verkokt (fachlich: karbonisiert), die resultierenden Kohlenstofffasern dann fein zermahlen. Mit Kunstharz getränkt, werden sie als klebrige Masse in Form gebracht. Ein Aufenthalt in einer beheizten Presse folgt, dabei härtet der Polymeranteil aus, und es entsteht als Zwischenschritt ein Rohling aus karbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK). Bei knapp 1000 Grad Celsius und Stickstoff-Atmosphäre wird daraus reiner Kohlenstoff, denn flüchtige Bestandteile entweichen.

Rubbelfrei auf nasser Fahrbahn

Als Nächstes erhitzen die Ingenieure metallisches Silizium auf etwa 1420 Grad Celsius. Die Karbonscheibe saugt die Schmelze auf, beim Abkühlen bildet sich Siliziumkarbid, eine Keramik, fast so hart wie Diamant.

„Karbon-Keramik bremst sofort und nicht erst ab 300 Grad", betont Hans-Michael Güther, Leiter der neuen Produktionsanlage. Der Grund dafür liegt in der Struktur: Reine Karbonscheiben haben bis zu 15 Prozent offene Poren, in denen sich Regenwasser und Luftfeuchtigkeit sammeln. Dieser Schmierfilm verringert die Reibung und muss erst durch mehrmaliges Bremsen verdampft werden. Die Zahl der Poren ist bei Karbon-Keramik-Scheiben wesentlich kleiner; ein wässriger Schmierfilm kann praktisch gar nicht entstehen.

Gegenüber der sonst gebräuchlichen Bremsscheibe aus Grauguss hat die aus dem Verbundwerkstoff außer einem niedrigeren Gewicht noch einen weiteren Vorteil: Sie verträgt Temperaturen bis zu 1000 Grad Celsius ohne Funktionseinbuße, während sich die aus Metall bei hohen Temperaturen leicht verzieht. Ihre Bremsbacken liegen dann nicht mehr

Das Unternehmen im Profil

Die SGL Carbon Group ist ein börsennotiertes und weltweit agierendes Unternehmen. 8200 Mitarbeiter, davon etwa 3300 in Deutschland, erwirtschafteten im vergangenen Jahr einen Umsatz von 1,233 Milliarden Euro. Der Firmensitz ist Wiesbaden, der wichtigste Produktionsstandort in Deutschland befindet sich in Meitingen. Das Unternehmen ist Marktführer bei Kohlenstoff- und Grafitprodukten wie Grafit-Elektroden für die Elektrostahl-Erzeugung. Zudem hat sich SGL auf Korrosionsschutzsysteme, Bremsscheiben, Brennstoffzellenkomponenten und Karbonfasern für die Luft- und Raumfahrt spezialisiert.



LINKS: PORSCHE, RECHTS: M. BOECKH



Bremsscheiben aus Karbon-Keramik sollen sofort und in jedem Temperaturbereich bis 800 Grad Celsius greifen (links). Dementsprechend groß ist insbesondere das Interesse der Sportwagen-Hersteller. Ausgangsmaterial ist unter anderem Silizium (oben; das metallische Pulver). In einem Hochvakuum-Ofen wird es verflüssigt und von einem Karbon-Rohling aufgesogen.

planparallel, beginnen zu vibrieren und bremsen nicht mehr zuverlässig. Warum sogar regennasse Fahrbahnen die neuen Scheiben unbeeindruckt lassen, ist den Entwicklern selbst noch nicht klar. Vermutlich fließt der Wasserfilm rascher ab, ein Effekt der geringeren Oberflächenhaftung der Wassermoleküle.

Der mechanische Abrieb, so eines der Hauptargumente von SGL und Porsche, sei so gering, dass eine Bremsscheibe 300 000 Kilometer hält – länger, als es für das Fahrzeug selbst vorgesehen ist. Weil sie – trotz eines zwanzig Millimeter größeren Durchmessers – nicht einmal halb so schwer ist wie die Grauguss-Bremsscheibe, hilft Karbon-Keramik überdies beim Kraftstoff-Sparen. Zudem verbessere sich laut Hersteller die Fahrdynamik, da weniger Masse ungefedert auf das Rad einwirkt. Grund genug auch für Continental Teves, einen der größten Produzenten von Pkw-Bremsanlagen, mit SGL eine Keramikbremse zu entwickeln.

Zu heiß für die Schiene

Nicht nur Automobilhersteller möchte SGL als Kunden gewinnen, sondern auch die Deutsche Bahn. Im Auftrag des Unternehmens Knorr-Bremse bauten die Ingenieure Bremsscheiben für den Intercity-Express. Etwa achtzig Kilogramm soll jede Scheibe leichter werden als bisher, bei drei Scheiben pro Achse könne ein Zug dann mehrere Tonnen Gewicht abspecken. Die Folgen: weniger Energie beim Beschleunigen, kürzere Fahrzeiten und eine geringere Belastung des Schienenunterbaus.

Doch im Augenblick hat Knorr die Bremse angezogen. Der Grund: Bei heftigen Bremsmanövern, wie sie ein ICE mindestens einmal pro Woche vollführt, erhitzten sich die Prototypen auf mehr als 1000 Grad Celsius. „Die Kohlenstofffasern brennen dann quasi heraus“, dämpft Xaver Wirth, Entwicklungsleiter bei Knorr-Bremse, die Erwartungen. Ein höherer Verschleiß und damit höhere Kosten sind die Folgen. So bliebe nur der reine Gewichtsvorteil. Doch mit einer neuen Rezeptur verbessert SGL zurzeit in Kooperation mit Knorr-Bremse den Oxidationsschutz, um auch die geforderten langen Standzeiten der Bahn zu erreichen. Schließlich soll die Karbon-Keramik auf jeden Fall auch für die Schiene salonfähig gemacht werden.

Martin Boeckh

Der Autor studierte Physik und Geografie und lebt als freier Wissenschaftsjournalist in Gaiberg bei Heidelberg.

SOZIALFORSCHUNG

Zeitenwende

Mit dem Wertewandel, der Ende der 1960er Jahre abrupt einsetzte und die Bundesrepublik erschütterte, scheint es nun vorbei zu sein.

Von Elisabeth Noelle-Neumann und Thomas Petersen

Rund dreißig Jahre ist es her, dass sich in vielen westlichen Ländern – ganz besonders aber in Westdeutschland – ein tiefgreifender Wertewandel vollzog. Der damals neu eingezogene Zeitgeist sollte die nachfolgenden Jahrzehnte bestimmen – ziemlich genau die Spanne einer Generation.

Dieser Wertewandel wurde zufällig 1967 bei einer Befragung durch unser Institut entdeckt: Was sollen Kinder im Elternhaus lernen? Auf der Liste möglicher Erziehungsziele standen unter anderem Höflichkeit und gutes Benehmen, Sauberkeit, Sparsamkeit, die Arbeit ordentlich und gewissenhaft tun (siehe Grafik auf S. 96).

Eine Wiederholung der Befragung fünf Jahre später zeigte das, was der Speyerer Sozialwissenschaftler Helmut Klages später den „Wertwandlungsschub“ genannt hat: Was 250 Jahre lang als bürgerliche Tugenden galt, hatte binnen weniger Jahre viel an Bedeutung verloren. Diese Veränderung zog sich durch alle sozialen Schichten und stets am radikalsten bei denen, die jünger waren als dreißig Jahre. Noch 1967 meinten immerhin 81 Prozent der Unter-Dreißigjährigen, Kinder sollten im Elternhaus Höflichkeit und gutes Benehmen lernen; 1972 waren es nur noch 50 Prozent. Im gleichen Zeitraum sank die Zustimmung zum Erziehungsziel „die Arbeit ordentlich und gewissenhaft tun“ von 71 auf 52 Prozent.

Auch andere Befragungen zeigten: Die Bevölkerung hatte ihre Einstellung zu einer Vielzahl von Themen radikal geändert, unter anderem in der Politik, im Verhältnis zur Kirche und in den Normen, ganz besonders in den Sexualnormen. Das bedeutete weit mehr als die Ablösung überkommener Erziehungsziele: Zum ersten Mal wurden Regeln der Lebensführung in Frage gestellt, die seit den ersten Jahrzehnten des 18. Jahrhunderts unangefochten schienen.

Dieser Wertewandel war in einer Vielzahl westlicher Länder zu beobachten, doch nirgendwo stärker als in Westdeutschland. In der Folge entstand eine tiefe Kluft zwischen den Generationen.

Wie stark sich Eltern und Kinder voneinander entfernten, zeigten deutlich die Ergebnisse einer Allensbacher Testfrage, die seit Anfang der 1980er Jahre international gestellt wurde: „In welchen dieser fünf Werte stimmen Sie mit Ihren Eltern überein?“ Zur Auswahl stehen Einstellungen zur Religion, Politik, Moral, zum Umgang mit anderen Menschen und zur Sexualität. Als diese Frage erstmals 1981 in Deutschland gestellt wurde, erklärten 23 Prozent der Unter-Dreißigjährigen, sie stimmten in keinem der genannten Bereiche mit ihren Eltern überein. In den darauf folgenden Jahren stieg ihr Anteil sogar auf bis zu 35 Prozent. In den USA hingegen gaben weniger als 10 Prozent diese Antwort.

Der Wandel lässt sich kaum verstehen, ohne die Rolle des Philosophen und Soziologen Theodor Adorno zu würdigen. Er propagierte, die Weitergabe von Wertvorstellungen an die Kinder zu unterbrechen, um so eine Wiederholung der Greuel der nationalsozialistischen Zeit zu verhindern. Denn die Wurzeln des Dritten Reichs sah er im autoritären Erziehungsstil deutscher Prägung, der Kinder zu willenlosem Gehorsam zwinge. Adorno verankerte seine Überzeugungen in der so genannten Frankfurter Schule, einem gesellschaftskritischen Kreis von Sozial- und Kulturwissenschaftlern, und über deren Geist inspirierte er die 68er-Studentengeneration in erheblichem Maße.

So gelang es tatsächlich, viele Eltern davon zu überzeugen, dass sie ihre Kinder in wichtigen Fragen der Lebensorien-



Das Aufbegehren gegen Vietnam-Krieg und bürgerliche Ordnung 1968 riss eine tiefe Kluft zwischen den Generationen auf (links). Dreißig Jahre später hatte diese ihre politische Dimension weitgehend verloren (unten, Loveparade): Mittlerweile gleichen sich die Werte von Eltern und Jugendlichen wieder an.

BEIDE FOTOS: ULLSTEINBILD

tierung nicht beeinflussen dürften. Das zeigte eine Allensbacher Umfrage von 1986. Zwar wollten zwei Drittel der Befragten ihren Nachkommen beibringen, ihre Sachen in Ordnung zu halten; ganz oben auf der Prioritätenliste standen auch der Umgang mit anderen Menschen, Tischmanieren und der Umgang mit Geld. Am wenigsten aber wollten die Eltern auf grundsätzliche Wertorientierungen Einfluss nehmen – darunter die Einstellung zur Religion (33 Prozent), welche Vorbilder man sich sucht (23 Prozent) und politische Ansichten (19 Prozent).

In der zweiten Hälfte der 1970er und in den 1980er Jahren verlor der Wertewandel zwar an Fahrt, doch die Entwicklung ging weiter. Das deutlichste Indiz: Die Generationskluft vergrößerte sich. Der Anteil derer, die auf die Frage „In welchen Punkten stimmen Sie mit Ihren Eltern überein?“ antworteten: „In keinem Punkt“, stieg bei den Unter-Dreißigjährigen im Laufe der 1980er Jahre auf rund 30 Prozent und verharrte auf diesem Niveau bis zum Ende der 1990er Jahre.

Gleichheit contra Freiheit

In den neuen deutschen Bundesländern stellte sich die Situation nach der Wiedervereinigung zunächst anders dar: Erste Umfragen unseres Institutes im Frühjahr 1990 zeigten, dass die Einstellungen zur Familie, zur Arbeit und zur Kindererziehung denen der westdeutschen Bevölkerung in den 1950er Jahren ähnelte. Einzige Ausnahme: Die Gleichheit genoss in den neuen Bundesländern einen höheren Stellenwert als die Freiheit des Einzelnen. Eine Generationskluft war zudem nicht erkennbar. Doch in den darauf folgenden Jahren wurden offenbar Werte ausgetauscht. Während in den alten Bundesländern die Ansicht an Boden gewann, im Zweifel sei doch die Gleichheit der Freiheit vorzuziehen, holte die Bevölkerung der neuen Bundesländer in wenigen Jahren den Wertewandel des Westens nach.

Zum Beispiel nahm dort die Zahl der Menschen mit einer hedonistischen Lebenseinstellung rasch zu. Das demonstrierte eine Gegenüberstellung zweier Lebensmodelle: „Ich möchte in meinem Leben etwas leisten, auch wenn das oft schwer und mühsam ist“ gegen „Ich möchte mein Leben genießen und mich nicht mehr abmühen als nötig“. In der Zeit von 1990 bis 1996 wuchs die Zustimmung zur zweiten Aussage in Ostdeutschland von 21 auf 48 Prozent. Schließlich tat sich auch dort eine – allerdings schwächere – Generationskluft auf. Die Zahl derer, die sagten, sie hätten nichts mit ihren Eltern gemein- ▶

Kommentar

Fathers & Sons Inc.

Die Musikindustrie versteht die Welt nicht mehr

Rock around the clock“ hämmerte Bill Haley einer jungen Generation ein, die in schwierigen Zeiten heranwuchs. Und die Eltern waren entsetzt ob der emotional geladenen Musik. Als Elvis Presley und hier zu Lande Peter Krauss mit ihren Hüftschwüngen Teenager zum Kreischen brachten, galt der Rock ’n’ Roll gar als gefährlich für Moral und Anstand. Gerade das gab erst den rechten Schwung: „Wir sind die Leute, vor denen uns unsere Eltern immer gewarnt haben“, spotteten nicht nur die Linken der Siebziger. Pop und Rock verhalfen Jugendlichen zu einer eigenen Identität, die sich von der Kultur der Erwachsenen abgrenzte.

Doch bald fraß die Revolution ihre Kinder: Die elektrifizierte U-Musik leistete einer gigantischen Industrie Geburtshilfe, denn sie benötigte deren Produktionsmittel. Auf maximalen Profit gerichtet, bietet die Branche heute vor allem zielgruppenorientierte Massenware zu Höchstpreisen. Warum kostet eine CD nicht wenige Euro, wenn doch Material und Herstellung nur Cent-Beträge verschlingen?

Doch die Boomzeiten sind vorbei, denn eine neue Generation hat die Bühne betreten. Brav befolgt sie die Empfehlung von Viva und MTV: Kauft die richtigen Klamotten, tragt die angesagte Haarfarbe, hört die korrekte Musik und bejubelt die neuen Bandprojekte. Zwar stürzt sie sich mit Freude in den Konsumrausch – nur berappen wollen viele dafür nichts.

Die neue Generation surft im Internet, chattet und tauscht. Noch immer ist Musik Ausdruck ihres Lebensgefühls, aber das World Wide Web gehört mit dazu. Im *global village* gibt es irgendwo immer einen Kumpel, der die neue Scheibe von Wem-auch-immer ins Netz stellt. Das MP3-Format macht es möglich und die schnelleren Verbindungen durch ISDN oder DSL machen es leichter.

Während Internet-Provider, PC-Industrie und Fachzeitschriften davon profitieren, sieht die Musikbranche ihre Felle davonschwimmen. Die amerikanische Schallplattenindustrie veröffentlichte jüngst eine von ihr beauftragte Studie unter Nutzern von Tauschbörsen (http://www.pcwelt.de/news/internet/25737/). Demnach hat unter dem Strich ein Fünftel dieser Klientel weniger CDs gekauft als früher. Bei rund zwei Millionen Tauschwilligen an einem normalen Tag allein im Netz der Börse KaZaa kommt da schon einiges zusammen. Es ist ein Skandal!!

Aber ist es das wirklich? Oder steht die Musikindustrie dem Phänomen der Tauschbörsen nicht ebenso unverständig gegenüber wie vor wenigen Jahrzehnten die ältere Generation kreischenden Gitarren und langen Haare? Die Aktionen der Branche zeigen jedenfalls kein Interesse an Konfliktlösung. Wo immer sich rechtliche Möglichkeiten bieten, wurden und werden sie genutzt: Napster musste schließen, Audiogalaxy ist tot, selbst einzelne Nutzer sollen demnächst vor Gericht stehen. Mehr noch: In die Tauschbörsen werden Gerüchten zufolge gezielt fehlerhafte Dateien und Viren eingeschmuggelt, um Nutzer abzuschrecken. Das Rezept ist altbekannt: Gegen die aufmüpfige Jugend helfen nur drakonische Strafen.

Nicht zaghaft, sondern schlicht verfehlt sind zudem die Versuche einzelner Firmen, sich ihrerseits an die Spitze der „Jugendbewegung“ zu stellen und das Tauschen von MP3-Files zu kommerzialisieren: Wer zwei Euro für ein Musikstück verlangt, muss sich nicht wundern, wenn seine Website kaum frequentiert wird. Die Branche hält sich mehr als bedeckt, verstrickt in einem mühsam aufgebauten Distributionsnetz, an dem viele partizipieren. Dass sich Jugendliche den Ast absägen, auf dem sie ihre Freizeit verbringen, dass ihre Musik ohne Industrie nicht denkbar ist, wird kaum vermittelt – das würde wohl zu viel Transparenz auf Seiten der Konzerne erfordern.

Musikdownload für wenige Cent, eine Kopierpfennigen vergleichbare Transfergebühr für MP3-Dateien, die von den Providern erhoben wird – das wären Lösungen, über die die Musikindustrie nachdenken sollte. Momentan fördert sie die Eskalation: Auf die vermuteten Virenangriffe und Drohungen reagierten Hacker bereits auf ihre Weise: Sie manipulierten die Webseiten des amerikanischen Verbandes der Musikindustrie und boten dort kostenfreien Download an. Offensichtlich haben diese Jugendlichen Fantasie.

Klaus-Dieter Linsmeier

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Traditionelle Tugenden gewinnen wieder an Bedeutung

wichtige Erziehungsziele:
Höflichkeit und gutes Benehmen
die Arbeit ordentlich und gewissenhaft tun
sparsam mit Geld umgehen
sich in eine Ordnung einfügen, sich anpassen

Prozent
90
80
70
60
50
40
30
1965 1970 1975 1980 1985 1990 1995 2000

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT NACH: ALLENSBACHER ARCHIV, IFD-UMFRAGEN

Das Institut für Demoskopie Allensbach stellt seit 1967 regelmäßig folgende Frage zu wichtigen Zielen der Erziehung: „Wir haben einmal eine Liste zusammengestellt mit den verschiedenen Forderungen, was man Kindern für ihr späteres Leben alles mit auf den Weg geben soll, was Kinder im Elternhaus lernen sollen. Was davon halten Sie für besonders wichtig?“ Die Ergebnisse – hier für die alten Bundesländer und alle Altersgruppen der Befragten dargestellt – zeigen, dass traditionelle Tugenden seit 1990 wieder an Bedeutung gewinnen. Der durch den Kurvenverlauf repräsentierte Wertewandel zieht sich durch alle soziale Schichten und ist bei den Unter-Dreißigjährigen besonders stark ausgeprägt.

sam, wuchs von 10 Prozent im Jahr 1990 auf rund 15 Prozent ab 1995.

Nun erst, in der zweiten Hälfte der 1990er Jahre, schien der Wertewandel seinen Höhepunkt überschritten zu haben. Zuerst zeigte sich der Trendwechsel an der Testfrage, zu welchen Tugenden man seine Kinder erziehen sollte. Die traditionellen Werte der Höflichkeit, der Arbeitsethik und der Sparsamkeit legten erstmals wieder zu. Selbst der Anteil derjenigen, die Kindern beibringen wollten, sich in eine Ordnung einzufügen, nahm wieder etwas zu (siehe Grafik oben).

Besonders auffällig an dieser neuen Entwicklung ist, wie sich die Einstellung zur Arbeit veränderte. In den 1960er Jahren erklärte die Mehrheit der berufstätigen Bevölkerung, die Stunden bei der Arbeit und in der Freizeit gleichermaßen zu mögen. Dann, mit dem Wertewandel, stieg scheinbar unaufhörlich die Zahl derjenigen, die antworteten: „Mir sind die Stunden lieber, in denen ich nicht arbeite.“ Der Höhepunkt dieser Entwicklung war 1994 erreicht, seitdem verläuft sie in Gegenrichtung. Im Jahr 2000 bekundeten erstmals wieder mehr Befragte, die Freizeit nicht zu bevorzugen.

Der deutlichste Hinweis auf ein Ende des dreißig Jahre dauernden Wertewandels ist das Zusammenbrechen der Generationskluft Ende der 1990er Jahre in Westdeutschland. Denn nur solange die nachwachsende Generation andere Ansichten in Wertefragen vertritt als die Elterngeneration, wird sich das Wertesystem der Gesellschaft verändern, da die Jungen ihre Ansichten allmählich durchsetzen. Wenn sich ihre Ansichten von denen der Älteren kaum noch unterscheiden, stabilisiert sich das System.

Binnen eines Jahres, von 1997 auf 1998, stürzte nun der Anteil der Unter-Dreißigjährigen, die sagten, in keinem der Bereiche Moralvorstellungen, Einstellung zu anderen Menschen, Einstellung zur Religion, zur Sexualität, Einstellungen in der Politik mit ihren Eltern übereinzustimmen, von 31 auf 18 Prozent. Seitdem ist er auf diesem Niveau geblieben, das im internationalen Vergleich immer noch hoch ist. Aber die deutsche Sondersituation, die extrem starke Generationskluft der 1980er und frühen 1990er Jahre, existiert nicht mehr.

Worin besteht der Sinn des Lebens?

Derselbe Trend ist auch bei anderen Fragen zu beobachten, etwa bei der Frage nach den Erziehungszielen. In den Ansichten, man solle die Kinder zu Höflichkeit und gutem Benehmen erziehen, und man solle ihnen beibringen, ihre Arbeit gründlich und ordentlich zu tun, unterscheiden sich die Unter-Dreißigjährigen und die älteren Deutschen so wenig, wie seit den 1960er Jahren nicht mehr.

Diese Renaissance traditioneller Werte bedeutet allerdings nicht, dass der gesamte Wertewandel nun umgekehrt wird. Der neue Zeitgeist knüpft an manche zwischenzeitlich vernachlässigte Tradition an; er ist aber keine Rückkehr in die 1950er Jahre. Manche Trends des Wertewandels setzen sich bisher ungebrochen fort, beispielsweise der Trend, mehr und mehr Gewicht darauf zu legen, dass die Kinder zur Durchsetzungsfähigkeit erzogen werden. Hier zeigt sich eine gewisse Härte, die gut zu der Tendenz passt, der Arbeit wieder mehr Bedeutung zuzumessen.

Ungebrochen ist auch der Trend zum Lebensgenuss. Noch immer sagt eine deutliche Mehrheit der westdeutschen Unter-Dreißigjährigen, die Hauptsache sei, das Leben zu genießen. Auf die Frage „Worin sehen Sie vor allem den Sinn des Lebens?“ antworten nach wie vor fast zwei Drittel der Bevölkerung: „Dass ich glücklich bin und viel Freude habe.“ An zweiter Stelle folgt auch hier die Antwort: „Der Sinn des Lebens besteht darin, das Leben zu genießen.“

Diese Ergebnisse zeigen, dass eine positive Einstellung zur Arbeit und zum Lebensgenuss keine Widersprüche sein müssen. Die kommenden Jahrzehnte könnten durch die Kombination beider – nur scheinbar gegensätzlicher – Werte geprägt sein. Die demonstrative Ablehnung von Leistung scheinen die meisten nicht mehr für nötig zu halten. Es ist, als habe sich eine Verkrampfung gelöst: Neue Werte bestehen neben den alten, Arbeit und Freude sind keine Widersprüche mehr. Liegt hier die Ursache für das Aufkommen des Begriffs „Spaßgesellschaft“ in den 1990er Jahren? ■

Prof. Dr. Elisabeth Noelle-Neumann *gründete 1947 das Institut für Demoskopie Allensbach und hatte wesentlichen Anteil am Aufbau des Instituts für Publizistik der Universität Mainz.* ***Dr. Thomas Petersen*** *studierte Vor- und Frühgeschichte und arbeitete als Journalist. Seit 1993 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter in Allensbach.*

MATHEMATIK

Ein großer Brückenschlag in der Algebra

Der 35-jährige Mathematiker Laurent Lafforgue hat die nobelpreisähnliche Fields-Medaille dafür erhalten, dass er einen wesentlichen Teil eines umfangreichen, 35 Jahre alten Forschungsprogramms erledigt hat.


IHES

Laurent Lafforgue

Von Christoph Pöppe

Mit einem simplen Brief an seinen berühmten Fachkollegen André Weil formulierte der kanadische Mathematiker Robert P. Langlands im Januar 1967 eine kühne Vermutung, die sich als äußerst weitsichtig erwies und große Forschungsaktivitäten ausgelöst hat. Im Endeffekt legte er damit auch dem damals zwei Monate alten Laurent Lafforgue ein Problem in die Wiege, das dieser später in siebenjähriger Arbeit glanzvoll bewältigte. Lafforgue ist einer der beiden herausragenden Forscher, denen im August dieses Jahres auf dem Internationalen Mathematiker-Kongress in Peking die Fields-Medaille verliehen wurde.

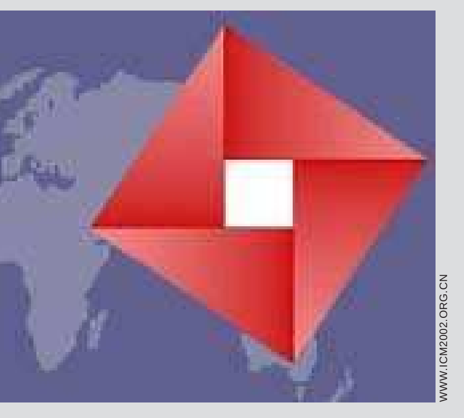
Der so Geehrte arbeitet am Institut des Hautes Études Scientifiques in der Nähe von Paris und verlängert damit die eindrucksvolle Liste der Fields-Preisträger, die aus diesem Institut stammen: Laurent Schwartz (1950), Jean-Pierre Serre (1954), René Thom (1958), Alexander Grothendieck (1966), Alain Connes (1982), Pierre-Louis Lions und Jean-Christophe Yoccoz (beide 1994; vergleiche Spektrum der Wissenschaft 10/1994, S. 22).

Das Resultat, für das Wladimir Drin'feld 1990 mit der Fields-Medaille ausgezeichnet wurde (Spektrum der Wissenschaft 09/1991, S. 30), war schon sehr abstrakt und allgemein; aber Lafforgue hat es mit seinem Ergebnis noch verallgemeinert. Und bei genauem Hinsehen stellt sich die Vermutung von Taniyama und Shimura, die Andrew Wiles zu seinem spektakulären Beweis des großen Fermat'schen Satzes (Spektrum der Wissenschaft 01/1998, S. 96) verhalf und nicht gerade an einem Mangel an Allgemeinheit und Abstraktion leidet, als ein Spezialfall der Vermutung von Langlands dar.

Es geht um einen Brückenschlag zwischen zwei eigentlich sehr verschiedenen Gebieten der Mathematik. An dem einen Ufer – nennen wir es das linke Ufer – liegt die Galois-Theorie, benannt nach Évariste Galois (1811–1832), der ihre Grundzüge hastig in einer Nacht skizzierte, bevor er am anderen Morgen im Duell tödlich verwundet wurde. Sie gibt unter anderem Auskunft auf die Frage, unter welchen Umständen eine Gleichung dritten, vierten, fünften … Grades durch Wurzelausdrücke auflösbar ist.

Den Praktiker, der von einer Gleichung wie $x^5+5x^3+2x^2+x+4=0$ nichts weiter wissen will als den Zahlenwert einer Lösung, interessiert die Galois-Theorie wenig. Die Analysis mit ihren Konzepten wie Stetigkeit, Grenzwert und

Die Fields-Medaille


WWW.ICM2002.ORG.CN

Über dem „Reich der Mitte", mit Mittelpunkt über Peking, schwebt das Logo des Internationalen Mathematikerkongresses 2002, das einen eleganten Beweis für den Satz des Pythagoras illustriert. Kleinere Ungenauigkeiten in der Küstengestalt Europas sind sicherlich mit der Konzentration auf die Mitte zu erklären.

Ein „Nobelpreis für Mathematik"

Feierlicher Höhepunkt des Internationalen Mathematiker-Kongresses, der alle vier Jahre mit durchschnittlich etwa 4000 Besuchern an einem anderen Ort der Welt stattfindet, ist die Verleihung der Fields-Medaille. Sie bringt dem Empfänger ungefähr so viel Ruhm ein wie ein Nobelpreis – wenn auch wesentlich weniger Geld. Jeweils ungefähr 10 000 Euro aus den Erträgen einer Stiftung, die aus den Überschüssen des Mathematiker-Weltkongresses in Toronto 1924 errichtet wurde, gehen an bis zu vier herausragende Mathematiker. In diesem Jahr hat das Preiskomitee sein Kontingent nicht voll ausgenutzt und nur zwei Preise vergeben.

Im Gegensatz zum Nobelpreis wird diese Auszeichnung nicht für ein wissenschaftliches Lebenswerk verliehen, sondern ausdrücklich an junge Mathematiker – es gilt eine De-facto-Altersgrenze von vierzig Jahren –, als Ansporn zu weiterer Tätigkeit. Unter diesen Umständen liegt die Leistung des Preisträgers regelmäßig noch nicht lange zurück, und es ist zu früh für einen Vergleich mit Leistungen in anderen Teilgebieten. Um trotzdem eine Art Ausgewogenheit herzustellen, wird das Preisverleihungskomitee jedes Mal neu berufen, wobei möglichst alle Teilgebiete gleichmäßig berücksichtigt werden sollen.

So verwundert es nicht, dass die Forscher, denen in der Großen Halle des Volkes in Gegenwart des Staatspräsidenten Jiang Zemin die Fields-Medaille verliehen wurde, beide im Umkreis von Algebra und Zahlentheorie arbeiten: Außer Lafforgue traf die Ehre den gleichaltrigen Vladimir Voevodsky, der in Moskau studierte, seit 1990 im Wesentlichen in den USA arbeitet und seit diesem Jahr Professor am Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey) ist. Sein Werk, für das dem Kenner die Stichworte „motivische Kohomologie" und „algebraische K-Theorie" einen Hinweis geben könnten, soll in einem späteren Artikel gewürdigt werden.

Seit einigen Jahren wird außer den Fields-Medaillen, mit ähnlichem Vergabeverfahren, der Nevanlinna-Preis für theoretische Informatik verliehen. Diesjähriger Preisträger ist der in Madras (heute Chennai, Indien) geborene Madhu Sudan vom Massachusetts Institute of Technology für seine Beiträge zu probabilistisch überprüfbaren Beweisen, der Nicht-Approximierbarkeit von Optimierungsproblemen und fehlerkorrigierenden Codes.

Konvergenz verschafft ihm die Gewissheit, dass es eine reelle Zahl gibt, welche die Gleichung löst, und die Numerik liefert ein Rezept, diese Zahl mit beliebig hoher Genauigkeit zu bestimmen. Der Algebraiker dagegen kennt zunächst keine anderen Zahlen als die rationalen (Brüche aus ganzen Zahlen). Nachdem schon eine einfache Gleichung wie $x^2-2=0$ keine rationale Lösung hat ($\sqrt{2}$ ist irrational), stellt sich die Frage, welche Zahlen man zu den rationalen hinzufügen muss, um eine bestimmte Gleichung lösbar zu machen.

Die Kunst der Körpererweiterung

Die Algebraiker sprechen von einem „Körper“ und meinen damit jede Menge, deren Elemente man nach Belieben durch Addieren, Subtrahieren, Multiplizieren und Dividieren miteinander verknüpfen kann (nur die Division durch null ist ausgeschlossen). Die Menge der rationalen Zahlen ist ein Körper, denn Summe, Differenz, Produkt und Quotient zweier rationaler Zahlen sind stets wieder rational. Wenn man zu dieser Menge nur $\sqrt{2}$ hinzunimmt, ist sie noch kein Körper. Man muss auch $\sqrt{2}+1$, $3\sqrt{2}$ und alles, was man durch Anwendung der Grundrechenarten aus $\sqrt{2}$ und einer rationalen Zahl machen kann, noch hinzufügen. Eine Körpererweiterung kann also ziemlich umfangreich und unübersichtlich geraten, vor allem, wenn man von der Zahl, die diese Erweiterung auslöst, nichts weiter weiß, als dass sie eben die Gleichung löst.

Zu den auslösenden Zahlen kann übrigens auch die Wurzel aus –1 gehören, die man allgemein mit i (wie imaginäre Einheit) bezeichnet, oder eine Zahl der Form $a+ib$, eine so genannte komplexe Zahl. Dass manche quadratischen Gleichungen keine Lösung haben, weil man aus einer negativen Zahl die Wurzel ziehen müsste, ist in den Augen der Algebraiker ein lästiges Nebenproblem, das sie sich durch Einführung komplexer Zahlen von Halse schaffen. Man pflegt die Menge der komplexen Zahlen durch eine Ebene zu veranschaulichen; die Zahl $a+ib$ entspricht dem Punkt mit den Koordinaten (a, b).

Ein Mittel, Überblick über eine Körpererweiterung zu gewinnen, ist deren so genannte Galois-Gruppe. Der erweiterte Körper lässt sich in einem gewissen Sinne aus Teilen zusammensetzen, die dem Urkörper sehr ähnlich sehen, und jedes Element der Galois-Gruppe entspricht einem solchen Teil.

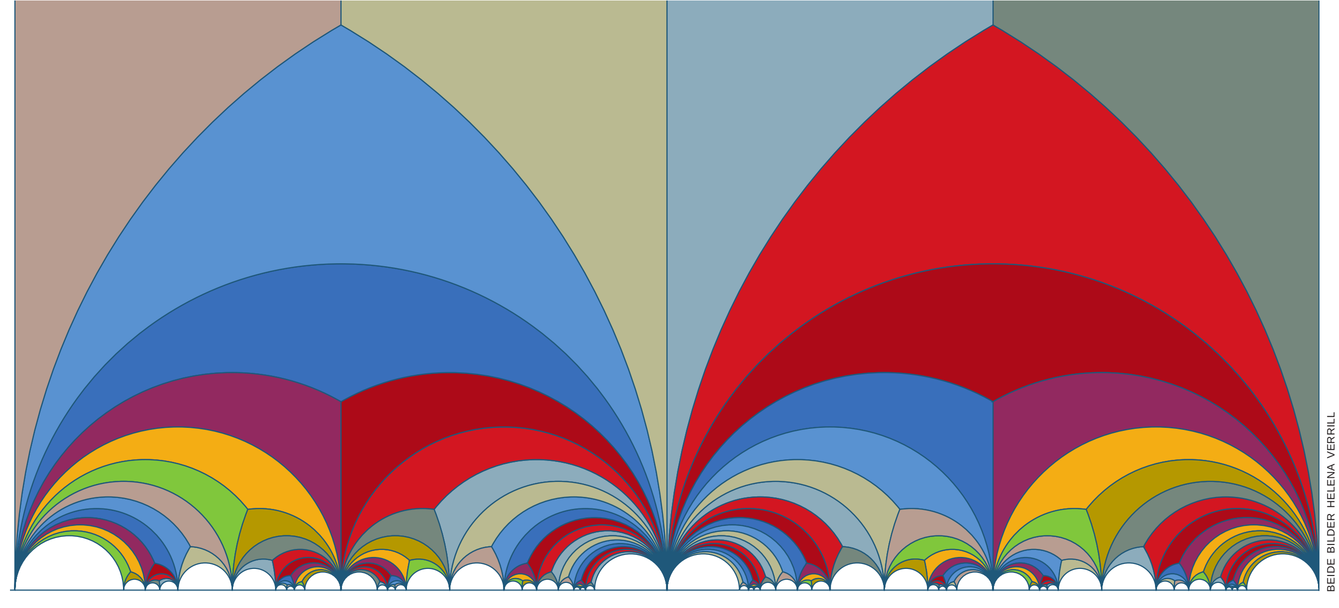
Soviel zum linken Ufer, der Galois-Theorie. Am rechten Ufer liegen die so genannten automorphen Formen. Es handelt sich um Verallgemeinerungen von periodischen Funktionen, deren bekannteste Vertreter die trigonometrischen Funktionen Sinus und Cosinus sind. Verschiebt man das Bild einer periodischen Funktion um eine feste Länge (zum Beispiel 2π für Sinus und Cosinus), so kommt es wieder mit sich selbst zur Deckung. Bei einer automorphen Form dagegen ist die unabhängige Variable nicht eine reelle, sondern eine komplexe Zahl, und es ist nicht nur eine Verschiebung nach rechts oder links, die eine automorphe Form unverändert lässt. Vielmehr gibt es eine ganze Gruppe von Verzerrungen („Transformationen“) der komplexen Ebene, die man auf die unabhängige Variable anwenden kann, ohne dass das Bild der Funktion sich wesentlich ändert (Bild Seite 100).

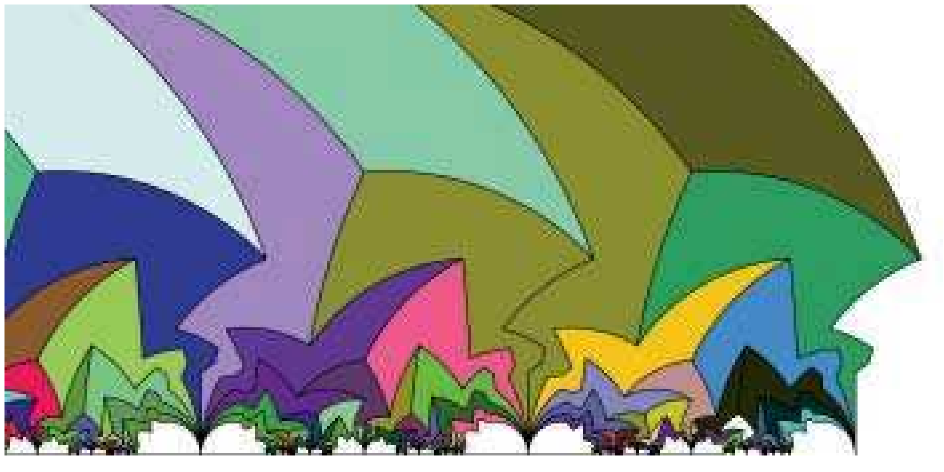
Gemeint ist – wie bei der oben erwähnten Galois-Gruppe – eine Gruppe im Sinne der Algebra; das ist eine Menge von Transformationen mit der Eigenschaft, dass man mehrere von ihnen hintereinander ausführen kann und das Ergebnis wieder eine Transformation ist, die zur Gruppe gehört. Zudem ist jede Transformation für sich umkehrbar.

Die Brücke zwischen den Ufern, die beide der Algebra angehören, besteht nun aus einem sehr unalgebraischen Material: unendlichen Reihen. Das sind Summen aus unendlich vielen Zahlen, die aber trotzdem einen endlichen Wert haben können. Damit das überhaupt möglich ist, müssen die unendlich vielen Summanden hinreichend schnell gegen null streben. Ob das der Fall ist, ob also „die Reihe konvergiert“, ist für jede Reihe, mit der man etwas anfangen will, nachzuprüfen, wofür die Analysis ein ganzes Arsenal von Kriterien bereitstellt.

Vor allem lässt sich mit Reihen trefflich rechnen. Vielleicht kann man ihre Glieder, die ihrerseits aus – endlichen oder unendlichen – Summen bestehen, in anderer Reihenfolge addieren. Oder man bildet das Produkt zweier Reihen, was darauf hinausläuft, jedes Glied der ersten Reihe mit jedem der zweiten Reihe zu multiplizieren, und sortiert die vielen Einzelprodukte geeignet um. Manche Rechenoperationen mit Reihen wirken wie große Mischmaschinen, die Informationen über unendlich viele Dinge bis zur Unkenntlichkeit verrühren und dann wieder in unendlich viele Schubladen einsortieren. Wenn man es geschickt anstellt, braucht man am Ende nur die richtige Schublade aufzuziehen und hat genau die Information, die man sucht.

Vom rechten Ufer bis zu den Reihen ist es nicht allzu weit: Für periodische Funktionen ist die Beschreibung durch ▶





Automorphe Formen bleiben im Wesentlichen unverändert, wenn man auf ihre unabhängige Variable eine beliebige Transformation aus einer (festgelegten) Gruppe anwendet. Diese Gruppen sind durch so genannte Fundamentalbereiche (farbige Flächen) charakterisierbar: Das Bild einer solchen Menge unter einer beliebigen Transformation der Gruppe hat mit der Menge selbst keinen Punkt gemeinsam, und alle diese Bilder zusammen bedecken lückenlos die obere Halbebene. Durch ihre Werte in einem Fundamentalbereich ist eine automorphe Form bereits festgelegt. Bei der Definition eines Fundamentalbereichs hat man gewisse Freiheiten: Auch die bizarr geformten Flächen rechts sind Fundamentalbereiche.

Reihen (die „Reihenentwicklung“) geradezu Standard. Ein musikalischer Ton ist eine periodische Funktion der Zeit, und seine Zerlegung in Grundton und Obertöne ist die Beschreibung dieser Funk-tion durch die so genannte Fourier-Reihe. Im Prinzip sind es unendlich viele Obertöne, aber sie werden immer schwächer – und müssen das auch, sonst würde die Fourier-Reihe nicht konvergieren.

Automorphe Formen sind nun „noch periodischer“ als die periodischen Funktionen; sie haben sogar verschiedene Reihenentwicklungen, die man ineinander umrechnen kann.

Der Weg vom linken Ufer zu den Reihenentwicklungen erfordert noch einen Zwischenschritt. Anstelle der Galois-Gruppe selbst verwendet man eine „Darstellung“ der Gruppe; das ist eine andere Gruppe, deren Elemente sich genauso verhalten wie die der dargestellten Gruppe, aber besser beherrschbar sind, weil es sich – in diesem Fall – um Drehungen und Spiegelungen in einem vieldimensionalen, aber ansonsten ganz gewöhnlichen Raum handelt. Allerdings können beim Darstellen gewisse Feinheiten des Originals verloren gehen.

Jedenfalls gibt es zu diesen Darstellungen von Gruppen Reihenentwicklungen, die wesentliche Informationen über die Gruppe enthalten – in sehr verrührter Form, aber immerhin. Das führt dazu, dass man eine Frage über Körpererweiterungen beantworten kann, indem man die analytischen Eigenschaften einer geeigneten Reihe untersucht.

Sätze von Gauß in neuem Gewand

Aus der Sicht der Algebra ist das eine etwas exotische Vorgehensweise, aber sie hat berühmte Vorbilder in der Zahlentheorie. Die Riemann’sche Zetafunktion ist eine Reihe, deren Glieder, je nach Darstellung, zu jeweils einer natürlichen Zahl oder auch nur zu jeweils einer Primzahl in Beziehung stehen. Auf diese Weise verrührt sie Informationen über unendlich viele Primzahlen, die man aus den analytischen Eigenschaften der Reihe wohlsortiert entnehmen kann (siehe „Group Representations and Harmonic Analysis from Euler to Langlands“ von Anthony W. Knapp, Notices of the AMS, Bd. 43, S. 410–415 und 537–549, 1996). Zentrale Ergebnisse der Zahlentheorie, die so genannten Reziprozitätssätze, die schon in den „Disquisitiones arithmeticae“ von Carl Friedrich Gauß (1777–1855) eine Hauptrolle spielen, wurden um 1927 von Emil Artin mit Hilfe von Reihenentwicklungen neu hergeleitet und vereinheitlicht; Artins *L*-Reihen sind die Vorläufer der Reihenentwicklungen, von denen hier die Rede ist.

Die Vermutung von Langlands besagt, dass die beiden Hälften der Brücke zusammenpassen: Jede *L*-Reihe einer Körpererweiterung ist auch Reihenentwicklung einer automorphen Funktion und umgekehrt. Lafforgue hat diese Vermutung für eine von drei verschiedenen Körperarten bewiesen, für die „Funktionenkörper“. Für eine weitere Art, die „*p*-adischen Körper“, haben Michael Harris von der Universität Paris VII und Richard Taylor von der Harvard-Universität, der schon Andrew Wiles die letzte Lücke in seinem Beweis stopfen half,1998 den Beweis erbracht. Offen ist die Frage nur noch für die alltäglichsten, aber offensichtlich schwierigsten Körper: die rationalen Zahlen und deren Erweiterungen. Aber nachdem nunmehr zwei Brücken über denselben (sehr langen) Fluss stehen, sind die Mathematiker zuversichtlich, dass ihnen die Konstruktion der dritten auch noch gelingen wird. ■

Christoph Pöppe *ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.*

GEORG HEBERER AWARD

Tierische Stammzellen verhindern Organabstoßung

Das „zweite Leben“ nach einer Organtransplantation ist von Normalität oft noch weit entfernt: Lebenslang müssen die Empfänger in hoher Dosis Medikamente einnehmen. Diese sollen eine Abstoßung des fremden Organs durch die körpereigene Abwehr verhindern. Während der chirurgische Eingriff zur Verpflanzung eines Organs dank perfektionierter Operationstechniken inzwischen fast schon Routine ist, leiden die Empfänger einer Organspende oft unter starken Nebenwirkungen der Medikamente.

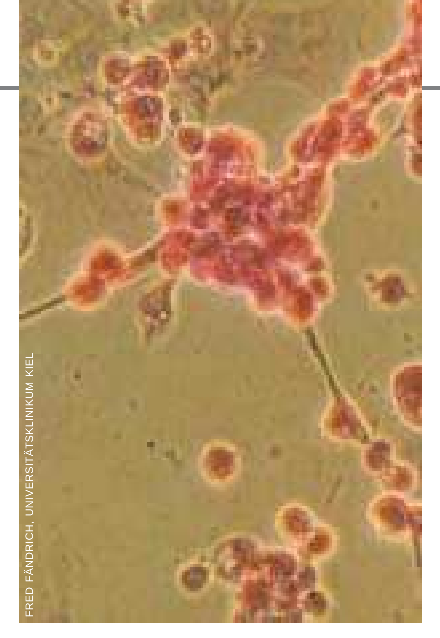
Die Transplantationsforschung sucht deshalb nach Mitteln und Wegen, mit denen sich die Toleranz des Immunsystems gegenüber Spenderorganen erhöhen und so eine Abstoßung bereits im Ansatz verhindern lässt. Einen wichtigen Beitrag für das Ermöglichen einer solchen Immuntoleranz beim Empfänger liefern die Arbeiten des Mediziners Fred Fändrich. Für seine Forschung an embryonalen Stammzellen von Ratten erhielt er kürzlich den mit 25 000 US-Dollar dotierten Georg Heberer Award.

Fändrich, der seit 1991 am Universitätsklinikum in Kiel tätig ist, stellte embryonale Stammzelllinien genetisch unterschiedlicher Ratten eines Stammes her. In Ratten eines anderen Stammes übertragen, führten die Stammzellen dort zu einer lang anhaltenden Immuntoleranz gegenüber transplantierten Herzen.

Worauf die Auslösung der Immuntoleranz durch die Stammzellen beruht, ist noch weitgehend unklar. Eventuell wird sie durch ein Protein bewirkt, das die embryonalen Stammzellen bilden. Dieser so genannte Fas-Ligand versetzt sie in die Lage, Zellen des Immunsystems abzutöten.

In künftigen Projekten will Fändrich genauer klären, welche Proteine für den beobachteten Toleranzeffekt verantwortlich sind. Diese könnten dann auch in Stammzellen übertragen werden, die man zuvor aus einem erwachsenen Organismus gewonnen hat (adulte Stammzellen).

Der Georg Heberer Award wurde nach dem international anerkannten Münchner Chirurgen und Wissenschaftler Georg Heberer benannt und wird jährlich durch die Ludwig-Maximilians-Universität in München verliehen. Gestiftet wird er von der seit fünfzig Jahren bestehenden US-amerikanischen Chiles Foundation.


FRED FÄNDRICH, UNIVERSITÄTSKLINIKUM KIEL


Fred Fändrich stellte die embryonale Stammzelllinie C12 (links) her, die in Ratten eine Immuntoleranz gegenüber fremden Organen bewirkt.

ADOLF-MESSER-PREIS 2002

Turbulente Strömungen und biologische Rhythmen

Was geschieht in den Verbrennungsräumen von Turbinen und Motoren? Dort, wo ein Großteil der Energiekonversion in unserer industriellen Welt stattfindet, setzen die Laser-Messverfahren des Physikers Andreas Dreizler an.

Dreizler untersucht damit chemisch reagierende, turbulente Strömungen und insbesondere turbulente Flammen. Ziel ist, über ein genaueres Verständnis der chemischen und strömungsmechanischen Vorgänge den Primärenergieverbrauch sowie die Schadstoffemissionen zu reduzieren. Nun wurde dem Physiker der Adolf-Messer-Preis 2002 verliehen.

Er teilt ihn sich mit Marc-Thorsten Hütt, ebenfalls ein Physiker. Hütt wendet Erkenntnisse der theoretischen Physik auf die Biologie an. So nutzt er neueste Methoden von nichtlinearer Dynamik und Komplexitätstheorie. Damit analysiert er die Physiologie der Pflanzen und deckt beispielsweise die Prozesse der Bildung von Mustern und periodischen Phänomenen auf, wie sie etwa die täglichen Rhythmen von Pflanzen darstellen.

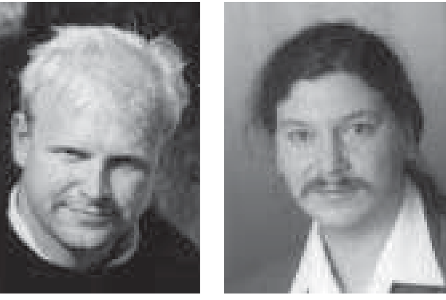
Dreizler studierte in Kiel und in Heidelberg, wo er 1995 an der Fakultät für Chemie promovierte. Seit 1999 ist er Abteilungsleiter „Technische Verbrennungsprozesse“ der Technischen Universität (TU) Darmstadt.

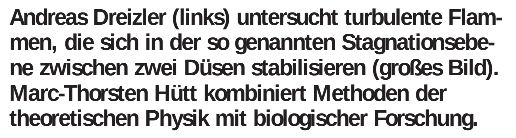
Hütt studierte in Göttingen, wo er 1997 auch promovierte, und in Paris. Er ist im Fachbereich Biologie der TU Darmstadt im Graduiertenkolleg „Kommunikation in biologischen Systemen: vom Molekül zum Organismus in seiner Umwelt“ tätig.

Der mit 50 000 Euro dotierte Preis wird von der Adolf-Messer-Stiftung vergeben. Errichtet wurde die Stiftung vom Gründer des Vorläuferunternehmens der Messer Griesheim GmbH.


ANDREAS DREIZLER






Andreas Dreizler (links) untersucht turbulente Flammen, die sich in der so genannten Stagnationsebene zwischen zwei Düsen stabilisieren (großes Bild). Marc-Thorsten Hütt kombiniert Methoden der theoretischen Physik mit biologischer Forschung.

1/1
WEKA
Zeitschrift.

ZOOLOGIE

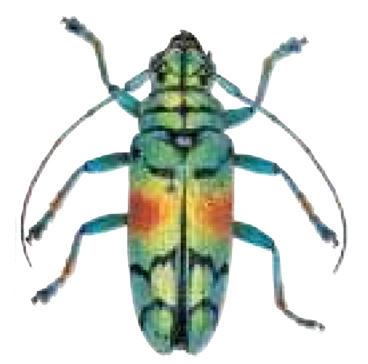
Poul Beckmann

Living Jewels

The Natural Design of Beetles

Prestel, München 2001. 112 Seiten, € 39,95

Sie leben meist verborgen: gut getarnt in grünem Blattwerk, unter Herbstlaub oder auf der Rinde eines Baumes. Sie täuschen mit bizarren Farbmustern Gefährlichkeit vor oder wehren sich mit übel riechenden und schmeckenden Substanzen. Käfer sind eine Welt für sich.



Der Bockkäfer *Arrhenotus raphaelae* aus Indonesien

Mehr als 350000 Arten sind inzwischen beschrieben. Von viele kennt man nur ein einziges Exemplar. Einige wenige richten große Schäden an, andere wurden früher zu kostbaren Gewändern verarbeitet. Ihre Schönheit regte schon immer zum Sammeln an. Im 19. Jahrhundert wurde daraus eine Leidenschaft. Selbst Charles Darwin (1809–1882) konnte an den Käfern noch viel über die Verwandtschaft der Arten lernen.

Wie soll man nun auf nur 112 Seiten etwas von ihrem Zauber an den Leser eines Buches bringen? Durch Geschick in der Auswahl und fantastische Bilder! Die Autoren, der in Dänemark geborene Poul Beckmann (Bilder) und Ruth Kaspin (Text), arbeiten in Kalifornien als Grafik- und Schmuckdesigner, Fotografen und Computergrafiker. Das merkt man den Bildern sofort an.

Auf 94 Tafeln werden Vertreter von 84 Arten stark vergrößert dargestellt. Sie stammen aus den neun (Unter-)Familien mit den spektakulärsten Arten: Rosen-, Dung-, Gold-, Nashorn-, Bock-, Pracht-, Rüssel-, Schnell- und Laufkäfer. Sie kommen aus aller Welt, vornehmlich aus den Tropen. Drei Arten vertreten Europa.

Der Titel des Buches ist etwas ungenau. Die Fotos stammen nicht von lebenden Tieren, sondern von perfekt präparierten (Museums-)Exemplaren. Sie wurden von oben, gelegentlich auch von der Seite gegen einen neutralen weißen Hintergrund aufgenommen. Nur ein ganz feiner Schlagschatten deutet den Raum an. Das aber bringt die überwältigende Schönheit erst voll zur Geltung. Jede einzelne Tafel könnte man rahmen und an die Wand hängen.

Mehreren Abbildungen sind zur Erhöhung der grafischen Wirkung Ausschnittsvergrößerungen der Deckflügel zur Seite gestellt – gelegentlich so stark vergrößert, dass einzelne Pixel sichtbar werden. Über

WISSENSCHAFT ALLGEMEIN

Graham Farmelo (Hg.)

It Must be Beautiful

Great Equations of Modern Science

Granta Books, London / New York 2002. 283 Seiten, $ 25,–

Für viele ist Mathematik ein notwendiges Übel, ein anspruchsvolles Werkzeug für bestimmte Zwecke. Einige der bedeutendsten Wissenschaftler hatten jedoch ein geradezu erotisches Verhältnis zu mathematischen Gleichungen: Die Formeln verliehen ihren Ideen Flügel, ließen sie abheben vom Boden der zeitgenössischen Wahrnehmung und neue Horizonte erobern. „Physikalische Gesetze sollten mathematische Schönheit besitzen“, schrieb Paul Dirac einmal in einem Seminar an die Tafel. Albert Einstein und Erwin Schrödinger sahen in der Eleganz einer mathematischen Formulierung durchaus einen weiteren Beleg für ihren Wert.

Dass sich die Phänomene der Natur durch mathematische Gleichungen beschreiben lassen, ist eine moderne Ansicht, die auf Galileo Galilei zurückgeht, schreibt Graham Farmelo. Dem Physiker am Science Museum in London ist es gelungen, einige wirkliche Koryphäen als Autoren zu gewinnen.

Farmelo vergleicht eine gelungene mathematische Formulierung mit einem Gedicht, an dessen Worten sich nichts verändern lässt, ohne alles zu entwerten. Es muss $E=mc^2$ heißen und nicht etwa $E=2mc$ oder $E=mc^3$. Und wenn die berühmte Formel als Logo auf T-Shirts und Plakaten prangt, steht sie nicht in erster Linie für die Äquivalenz von Masse und Energie, die bei der Entwicklung der Atombombe so entscheidend war, sondern mehr für die unkonventionelle Art Einsteins, die inzwischen zur Legende geworden ist.

Natürlich dreht sich mehr als die Hälfte des Buches um Ideen aus der Physik, der mathematischsten der Naturwissenschaften. Die Einstein-Gleichung der Allgemeinen Relativitätstheorie wird von Sir Roger Penrose persönlich vorgestellt und in Grundzügen immerhin erklärt – damit wirklich umzugehen, erfordert ein paar Semester höhere Mathematik. Penrose beginnt mit einer scheinbar einfachen Beobachtung von Galileo Galilei: Im freien Fall herrscht Schwerelosigkeit – doch die wirkliche Konsequenz daraus hat erst Einstein gezogen, indem er feststellte, dass Beschleunigung und Gravitation zwei Seiten derselben Medaille sind. Der Aufsatz von Penrose verlangt dem Leser einiges ab, keine Anekdoten mildern die Beschwerlichkeiten, in die durch Massen gekrümmten Geometrien der Raum-Zeit einzudringen. An der bizarrsten Lösung dieser Gleichung hat der Autor selbst maßgeblich mitgewirkt: den Schwarzen Löchern.

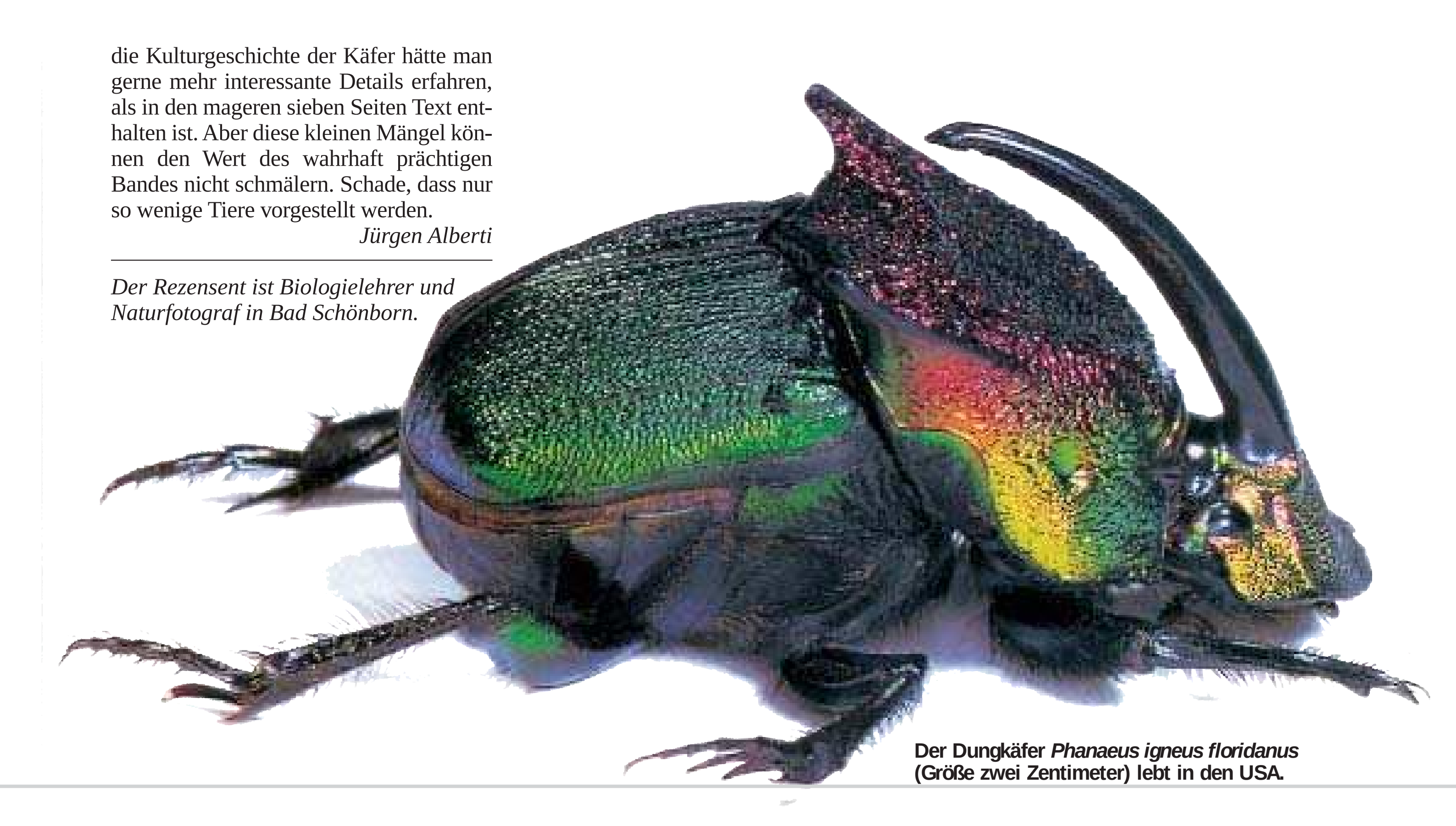


Andere erzählen richtige Geschichten und legen die menschlichen, historischen und physikalischen Verstrickungen dar, aus denen schließlich die neuen Ideen hervorgingen. Beispielhaft gelingt dies Christine Sutton mit einem besonders schwierigen Thema, den Yang-Mills-Gleichungen. Während der kurzen Zeit in den 1950er Jahren, als die Physiker Robert Mills und Chen Ning Yang sich ein Büro teilten, konnte Yang Mills mit seiner fixen Idee anstecken: Was hält die Atomkerne trotz ihrer gleichnamigen Ladungen zusammen? Auch für diese unbekannte Kraft, die starke Wechselwirkung, müssen Erhaltungssätze und Symme-

die Kulturgeschichte der Käfer hätte man gerne mehr interessante Details erfahren, als in den mageren sieben Seiten Text enthalten ist. Aber diese kleinen Mängel können den Wert des wahrhaft prächtigen Bandes nicht schmälern. Schade, dass nur so wenige Tiere vorgestellt werden.

Jürgen Alberti

Der Rezensent ist Biologielehrer und Naturfotograf in Bad Schönborn.



Der Dungkäfer *Phanaeus igneus floridanus* (Größe zwei Zentimeter) lebt in den USA.

triebedingungen gemäß dem Theorem von Emmy Noether verknüpft sein, mutmaßten sie. Die beiden formulierten mit diesen Überlegungen Gleichungen, die eine gewisse Ähnlichkeit mit den Maxwell'schen Feldgleichungen der Elektrodynamik haben. Die Quantenchromodynamik und zahllose Hochenergie-Experimente sind Früchte dieser Arbeit. Während Yang eine große Karriere machte, geriet Robert Mills bald in Vergessenheit. Ihre Gleichung ist rätselhaft und widerspenstig geblieben und nur scheinbar schlicht. Ihre saubere mathematische Behandlung ist eine der sieben Aufgaben, auf deren Lösung die Clay-Stiftung ein Preisgeld von einer Million Dollar ausgesetzt hat.

Als der Physiker Richard Feynman vor einigen Jahrzehnten über die Frage spekulierte, ob denn in jedem Fall Gleichungen das Mittel der Wahl sein müssen, um die Natur zu beschreiben, war er auf einer richtigen Spur: Spielregeln sind häufig viel besser geeignet, zum Beispiel für viele Fragen der Populationsdynamik und der Evolution.

Über die „Gleichungen des Lebens" schreibt in diesem Buch kein Geringerer als John Maynard Smith. Für ein Lebewesen gibt es oft nicht eine per se perfekte Strategie, erklärt der Doyen der evolutionären Spieltheorie, sondern das optimale Verhalten hängt vom Verhalten der anderen Lebewesen in derselben ökologischen Nische ab. Das Leben ist ein Spiel, in dem es um Gewinne in Form von Nachkommen geht, und dieses Spiel lässt sich mit einfachen Auszahlungstabellen mathematisch grob modellieren. Angreifen oder fliehen, männliche oder weibliche Eier legen, einen Harem kontrollieren oder lieber heimlich die Weibchen von Haremshaltern begatten? Solche Fragen des Lebens lassen sich manchmal einfach ausrechnen – von den theoretischen Biologen. Über die Generationen setzen sich Individuen durch, deren Strategie die meisten Nachkommen produzierte.

Doch mathematische Gleichungen müssen nicht zu einfachen Antworten führen oder gar geschlossen lösbar sein. Der bedeutende Zoologe und Ökologe Lord Robert May zeigt, wie eine schlichte Formel die oft beobachteten unvorhersehbaren und chaotischen Schwankungen in Populationen erklären kann. Die logistische Gleichung, die aus der Chaostheorie bekannt ist, verknüpft die Zahl der Nachkommen in einer Generation mit der Zahl der „Produzenten" der Generation zuvor, allerdings nicht linear, sondern mit einem Korrekturfaktor, der die Erschöpfung der Ressourcen durch zu zahlreiche Elterntiere wiedergibt. Die Lösungen dieser Gleichung zeigen bizarres Verhalten. Bei kleinen Wachstumsraten stabilisiert sich die Bevölkerung allmählich, bei größeren oszilliert sie zwischen zwei Werten, und bei noch größeren Werten springt die Zahl der Individuen von Generation zu Generation erratisch hin und her. Robert May war einer der ersten Biologen, welche die Bedeutung dieser Gleichung für ihr Fach erkannten. Seine Modelle wurden an Beobachtungen der Populationen des kanadischen Luchses und des Schneehasen eindrucksvoll bestätigt (Spektrum der Wissenschaft 02/1984, S. 46).

Doch für wen ist das Buch eigentlich geschrieben? Es ist kein Lehnstuhlbuch, das einem den Zauber der Wissenschaft mühelos und auf ästhetische Weise näher brächte. Es verlangt Konzentration, manche Essays sind von Vorlesungsmitschriften kaum zu unterscheiden, und Bilder gibt es keine. Vielleicht hat Graham Farmelo an Studierende gedacht, an Lehrende und an solche Leute wie mich, die vor Jahren mit Begeisterung Physik studiert haben. Sehr viel davon ist inzwischen vergessen, nicht aber die Faszination an sich, dass es tatsächlich möglich ist, mit einzeiligen Gleichungen ganze Gedankengebäude zu errichten. Und hier werden auf dem Silbertablett ein paar der schönsten serviert.

Antonia Rötger

Die Rezensentin ist promovierte Physikerin und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Berlin.



ASTROBIOLOGIE

Peter D. Ward, Donald Brownlee

Unsere einsame Erde

Warum komplexes Leben im Universum unwahrscheinlich ist

Aus dem Englischen von Eckard Helmers.
Springer, Berlin 2001. 374 Seiten, € 24,95

Wir sind nicht der Mittelpunkt der Welt. Seit den Tagen des Kopernikus haben Astronomie und Kosmologie uns das in Bezug auf die Erde, das Sonnensystem und unsere ganze Galaxis immer wieder aufs Neue bestätigt. In den letzten Jahrzehnten wollten uns viele Astrobiologen und berühmte Forscher wie Christian de Duve auch noch den letzten Grund zum Stolz nehmen: Das irdische Leben an sich sei ganz und gar nicht einzigartig, sagten sie. Vielmehr sei es angesichts der astronomischen Zahl fremder Planetensysteme sogar höchstwahrscheinlich, dass zehntausende ähnliche Zivilisationen im Universum existierten.

Diesem inzwischen zum Allgemeingut gewordenen Gedanken widersprechen Peter D. Ward, Professor für Geowissenschaften an der Universität von Washington in Seattle und mehrfacher Buchautor, und sein Kollege Donald Brownlee von der astronomischen Fakultät. Ihre „Hypothese der einsamen Erde“ besagt, dass komplexe Lebensformen wie Säugetiere auf Grund der unwahrscheinlich vielen Faktoren, die dafür passend abgestimmt sein müssen, extrem selten vorkommen, vielleicht sogar auf die Erde beschränkt sind. Dagegen seien niedere Lebensformen wie Bakterien eventuell viel häufiger anzutreffen, als heute vermutet wird. Das Buch besteht in einer sorgfältigen und stringenten Herleitung dieser Hypothese.

Einem kurzen Überblick über die verschiedenen archaischen und extremophilen Organismen auf der Erde folgt eine systematische Abhandlung der unterschiedlichen bewohnbaren Zonen eines Planetensystems. Danach wird die Geologie der Erde besprochen und detailliert nachgezeichnet, wie das Leben auf ihr seinen Lauf nahm. Fachbegriffe werden kurz und treffend erläutert.

Besonders die Kapitel über die so genannte Schneeballhypothese und die Bedeutung der Plattentektonik für die Entwicklung des Lebens sind sehr interessant und bringen die Detailkenntnisse der beiden Autoren zur Geltung. Nach der Schneeballhypothese hat die Erde im Laufe ihrer Geschichte mehrmals eine extreme Kältezeit durchgemacht. Die Autoren arbeiten mit vielen Indizien heraus, dass dies möglicherweise für das Entstehen der ersten eukaryontischen Zellen sowie für die kambrische Explosion, als sich die Anzahl der Tierarten enorm steigerte, von entscheidender Bedeutung war. Da sich die Umweltbedingungen nach einer Schneeballperiode für das Leben mit höheren Temperaturen dramatisch verbesserten, konnte die Evolution jeweils mit ein paar vorhandenen Grundstrukturen – seien es einzelne Zellen(teile) oder vollentwickelte Lebewesen – durchstarten und eine immense Vielfalt an Neuerungen innerhalb kürzester Zeit hervorbringen.

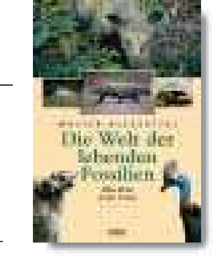
Ward und Brownlee zeigen auch auf, dass ein Ausbleiben der Plattentektonik samt den zugehörigen Vulkanausbrüchen nicht etwa der Entwicklung komplexen Lebens eine ruhige, konstante Umwelt geboten, sondern vielmehr diese Entstehung im Keim erstickt hätte. Unter anderem hätten sich die für das Leben unabdingbaren ausgeglichenen Temperaturen nicht eingestellt, wenn nicht der Vulkanismus und andere Phänomene der Plattentektonik für einen geregelten Nachschub an Treibhausgasen gesorgt hätten.

Der Begriff des Lebens wird erst relativ spät genau definiert; der Marsmeteorit ALH84001 und die darauf entdeckten Lebensspuren sowie die Idee der Panspermie werden nur kurz gestreift; die Gewichtung der verschiedenen Bereiche wirkt etwas unausgeglichen. Aber der rote Faden geht nie verloren, das Buch ist eine in sich geschlossene und logische Abhandlung des Titelthemas vom Anfang bis zum Ende. Der Text ist flüssig und einfach zu verstehen. Ein kapitelweise gegliedertes, ausführliches Literaturverzeichnis sowie ein gutes Namens- und Inhaltsverzeichnis runden das Werk ab.

Dank der umfangreichen und interdisziplinären Abhandlung der Astrobiologie kann das Buch fast schon als ein Standardwerk bezeichnet werden. Nur die etwas einseitige Fixierung auf eine unter mehreren Hypothesen trägt der Vielfalt der Forscheransichten nicht immer Rechnung. Als eines der wenigen seriösen Sachbücher der Astrobiologie sei es nichtsdestotrotz jedem außerirdisch Interessierten warm empfohlen.

Markus Mathys

Der Rezensent studiert interdisziplinäre Naturwissenschaften an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich.



ZOOLOGIE

Walter Kleesattel

Die Welt der lebenden Fossilien

Theiss, Stuttgart 2001. 192 Seiten, € 33,–

Dieses Buch erzählt uns die faszinierendsten Details über die Tierwelt – zum Beispiel – Australiens. Haben Sie gewusst, dass Schnabeltiere Elektrosensoren im Schnabel tragen? Mit ihnen nehmen die Tiere noch Spannungsunterschiede von 1/50 000 Volt wahr und orten damit im Schlick verborgene Kleinkrebse, Schnecken und Würmer an ihren Muskelpotenzialen – der bisher einzige bekannte Fall von Elektroortung oberhalb der Klasse der Amphibien.

Die Mutter bebrütet die Eier in einer mit Blättern ausgekleideten Erdhöhle; nach zehn Tagen etwa schlüpfen die Jungen, die noch einen Eizahn tragen. Sie saugen die Milch nicht von Zitzen, sondern lecken sie von zwei Milchfeldern – gesteuert aber wird die Milchproduktion vom Oxytocin wie bei höheren Säugern.

Wir erfahren von den ausgestorbenen Riesenfleischfressern, etwa den bis zu 60 Kilogramm schweren Riesen-Rattenkängurus. Heute umfassen die Raubbeutler alle Größenklassen zwischen Spitzmaus und dem dachsgroßen, jedoch hyänenartig lebenden Beutelteufel, der heute nur noch auf Tasmanien lebt. Sie haben alle Landlebensräume von den Wüsten bis zu den Regenwäldern besiedelt, ebenso wie die Kängurus, unter denen es sogar reine Baumbewohner gibt.

Der Niedergang der Beuteltierfauna in Australien ist nicht auf deren stammesgeschichtliche oder physiologische Unterlegenheit zurückzuführen, sondern auf die durch Kontinentalverschiebung bedingte Austrocknung des Kontinents seit 100 000 bis 50 000 Jahren, und in jüngster Zeit auf die schnelle Lebensraumzerstörung durch

 (Seiten 108 bis 110: Anzeige und Beihefter)

die Europäer. Die Evolution hat in Australien durchaus konkurrenzfähige Innovationen hervorgebracht: eine hohe genetische Änderungsgeschwindigkeit, etwa bei Fuchskusus nachgewiesen, die Muskeln der Kängurus als elastischer, Energie speichernder Sprungfederapparat und die Fähigkeit des Koalas zur Entgiftung hochtoxischer Pflanzenstoffe im Eukalyptus. Am deutlichsten aber zeigt ein amerikanisches Beuteltier, das Nordopossum, dass man



Beutelmarder sind nach dem Beutelteufel die größten noch lebenden Raubbeutler.

als Beutler sehr wohl unter Plazentatieren erfolgreich sein kann. Erst vor 100000 Jahren aus dem mittelamerikanischen Opossum entstanden, breitet es sich beständig immer weiter aus, ist in Südkanada selbst bei 7 Grad unter null noch aktiv und bewohnt Lebensräume von 0 bis 2800 Meter Höhe über dem Meer einschließlich der Großstädte und Vorstadtsiedlungen.

So viel und noch mehr steht in einem einzigen dreißigseitigen Kapitel, das damit die Höhen und Tiefen des Buches besonders verdeutlicht. Der Zoologe und Lehrbuchautor Walter Kleesattel lässt sich von seiner Begeisterung zu einem wilden Parforceritt hinreißen, zu dem keine Überschrift mehr passt.

Das Kapitel über Küsten/Flüsse und Sümpfe beginnt mit den Mangroven, bewegt sich zum Pfeilschwanzkrebs der flachen Meeresküsten, von dort zur Evolutionsgeschichte der Spinnentiere, zu Seekühen, Flussdelfinen, japanischen Riesensalamandern, zu stammesgeschichtlich alten Amphibien, von dort zur Stammesgeschichte der Knochenfische, einer (sehr guten und grafisch illustrierten) Darstellung der Evolution von Lunge und Schwimmblase, dann zu heute lebenden altertümlichen Knochenfischen und von dort zu Flusspferden, Zwergflusspferden, der kurzen Erwähnung fossiler Flusspferde in Europa, schließlich zu den Krokodilen, mit spezieller Betonung auf echtem und falschem Gavial. Nun ist das alles hochspannend, und wenn man in einer ▶

PREISRÄTSEL

Zehn mal sechs

Quelle unbekannt; mitgeteilt von Heinz Rauch

Versehen Sie die einzelnen Ziffern links vom Gleichheitszeichen mit möglichst wenig Rechenzeichen, sodass alle Gleichungen richtig gestellt werden:

0 0 0 = 6	1 1 1 = 6
2 2 2 = 6	3 3 3 = 6
4 4 4 = 6	5 5 5 = 6
6 6 6 = 6	7 7 7 = 6
8 8 8 = 6	9 9 9 = 6

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D–69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Regenschirme „Osiris“. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 15. Oktober 2002, eingehen.

Lösung zu „Flurbereinigung“ (August 2002)

Jans Acker hat einen Flächeninhalt von 33 Ar.

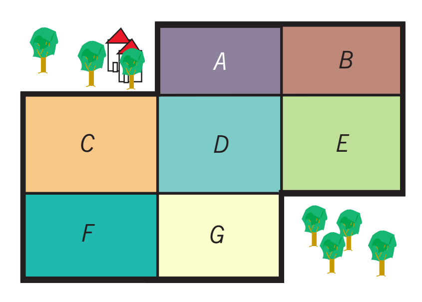
Thomas Schirmer aus Darmstadt zerlegte das Achteck in zwei sich überschneidende Rechtecke: eins aus den Parzellen *A*, *B*, *D* und *E*, das andere aus *C*, *D*, *F* und *G*.

Da die Parzellen *A*, *B*, *D* und *E* sich zum Rechteck fügen, muss für ihre Flächeninhalte die Gleichung $A/B=D/E$ gelten, und *A*, *B*, *D* und *E* müssen verschiedene ganze Zahlen zwischen 1 und 9 sein. Diese Bedingungen sind bereits sehr einschränkend. Durch systematisches Ausprobieren findet man, dass es nur fünf wesentlich verschiedene Zahlenquadrupel gibt, die sie erfüllen:

$$1/2=3/6$$
$$1/2=4/8$$
$$2/3=4/6$$
$$2/3=6/9$$
$$3/4=6/8$$

Natürlich darf man beide Seiten der Gleichung vertauschen und Kehrwerte bilden.

Dieselben Überlegungen für das Rechteck *CDFG* ergeben, dass auch die Gleichung $C/D=F/G$ eine der aufgeführten Lösungen haben muss.



In den Quadrupeln sind die Zahlen 5 und 7 nicht vertreten. Wenn also das Problem eine Lösung hat, dann muss jede der übrigen einstelligen Zahlen als Flächeninhalt genau einer Parzelle vorkommen. Deren Summe und damit die Gesamtgröße des Ackers ist 33 Ar.

Aber gibt es eine Lösung? Parzelle *D* steht in beiden Gleichungen, also muss ihre Fläche – und nur sie – in zwei Quadrupeln vorkommen. Die einzigen Quadrupel, die genau eine Zahl gemeinsam haben, sind $1/2=4/8$ und $2/3=6/9$.

Also ist 2 die Fläche von *D*. Die Vier und die Neun müssen der Zwei diagonal gegenüber liegen; also ist $B=4$ und $F=9$, oder umgekehrt. Für die Drei und die Sechs einerseits, die Eins und die Acht andererseits gibt es wieder jeweils zwei Anordnungen zur Auswahl. Insgesamt ergeben sich folgende acht Lösungen:

A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*
8	4	3	2	1	9	6
8	4	6	2	1	9	3
1	4	3	2	8	9	6
1	4	6	2	8	9	3
3	9	8	2	6	4	1
6	9	8	2	3	4	1
3	9	1	2	6	4	8
6	9	1	2	3	4	8

Die Gewinner der fünf Würfelsets „Baumbestimmungswürfel“ sind Thomas Wirth, Hainburg; Ulrika Steinbrück, Rottenburg; Stefan Dorn, Ettling; Luzi Matile, Zürich; und Bernhild Knichel, Rüsselsheim.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet „Mathematik“ jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.



Große Ohren und lange Hinterbeine verschafften dem Hasenbeutler seinen Namen.

Zoo- oder Museumsführung eine solche Fülle von Information erzählen könnte, wäre einem der Erfolg sicher. Aber nur ein kleiner Teil der angeführten Tiere passt selbst in eine weitläufige Definition des Konzeptes „lebende Fossilen“, die der Autor in einer Einleitung gibt: Arten, die stammesgeschichtlich schon sehr alt, seit langem unverändert und als letzte Vertreter einer ganzen großen systematischen Gruppe übrig geblieben sind. In manchen Fällen gibt Kleesattel dies auch zu.

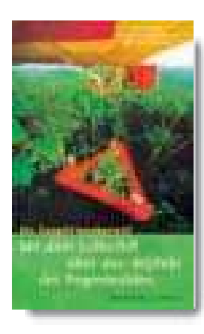
Vollends verwässert wird das Konzept dann mit dem letzten Kapitel „Die letzten ihrer Art“, das am Beispiel von Wisent, Bison und Ur-Wildpferd erfolgreiche Artenschutzprojekte vorstellt, dann über einige derzeitige Erhaltungszuchtprogramme zu einer (sehr verknappten) Besprechung der Problematik von Wiederansiedelungen / Wiederausbürgerungen und anschließend über die Genomanalysen des Mammuts zu den eventuellen Möglichkeiten der Gentechnik im Artenschutz führt.

Wohlgemerkt: Das Buch ist eine überaus reichhaltige Fundgrube für alle Interessierten und eine Quelle möglicher Begeisterungsfunken für die noch nicht Faszinierten. Neben den sehr gut lesbaren Texten sind Farbfotos, Verbreitungskarten und Schema-Abbildungen geeignet, das Geschriebene zu veranschaulichen. Einige kleine Detailmängel fallen bei der Materialfülle nicht ins Gewicht. Im Literaturverzeichnis sind die Arbeiten der 1990er Jahre, von etlichen „Spektrum“-Artikeln abgesehen, nur sehr dürftig vertreten.

Ein lesenswertes, gut illustriertes Buch – aber ein anderer Titel hätte ihm besser gestanden.

Udo Gansloßer

Der Rezensent ist Privatdozent am Institut für Zoologie der Universität Erlangen-Nürnberg.



ERLEBNISBIOLOGIE

Francis Hallé mit Dany Cleyet-Marrel und Gilles Ebersolt

Mit dem Luftschiff über den Wipfeln des Regenwaldes

Ein Expeditionsbericht

Aus dem Französischen von Hans-Joachim Maass.
Frederking & Thaler, München 2001. 253 Seiten, € 24,–

Den Regenwald erkundet man am besten von oben. Denn was es im Unterholz zu entdecken gibt, ist allenfalls ein billiger Abklatsch vom Leben in den rund fünfzig Meter Höhe der Baumkronen. Als der Biologe Terry Erwin 1982 erstmals große Mengen von Insekten in den Baumkronen Mittelamerikas sammelte – er spritzte das natürliche Insektizid Pyrethrum in großen Mengen in die Bäume und bestimmte, was ihm entgegenfiel –, musste er die bisherige Schätzung von drei Millionen Tier- und Pflanzenarten auf das Zehnfache erhöhen.

Doch wie forscht man am besten und sichersten in luftiger Höhe? „Der Architekt“ Gilles Ebersolt, „der Pilot“ Dany Cleyet-Marrel und „der Biologe“ Francis Hallé, so werden die drei Hauptakteure vorgestellt, praktizieren seit fünfzehn Jahren eine ebenso einfache wie geniale Lösung dieses Problems.

Die Franzosen arbeiten von einem Baumfloß aus, einem sechseckigen Gebilde aus Luftschläuchen und Netzen, das an ein riesiges Schlauchboot erinnert und von einem Luftschiff auf den Wipfeln des Waldes zielgerichtet abgesetzt werden kann (Bild rechts). Mit 600 Quadratmetern hat es etwa die Oberfläche eines Tennisplatzes. Daneben erlauben weitere einfallsreiche Konstruktionen ganz neue Einblicke in die Welt der Baumkronen: Das Pontondreieck (auf dem Cover abgebildet) wird vom Luftschiff aus gesteuert, während die Kronenkugel, ein Heliumballon mit Passagiergondel, an einem Seil entlanggeführt wird. Beide dienen dazu, im Flug beziehungsweise Schweben über dem Regenwald Proben und Daten zu sammeln. Der Icos-Käfig, eine transportable Konstruktion aus Hartkunststoff und Aluminium von der Form eines Ikosaeders, wird zwischen die Äste eines Baumes geklemmt und dient dort in erster Linie den Ornithologen (Vogelforschern) als Beobachtungsstation.

Durch hautnahe Einblicke in den Alltag der Forscher werden die Arbeit und das Leben in und auf dem Regenwald anschaulich und mitreißend dargestellt. Schon das allmorgendliche Erwachen ist im Urwald etwas ganz Besonderes, von einer Nacht auf dem Baumfloß ganz zu schweigen. Das Arbeiten auf dem Floß erweist sich als unerwartet schwierig. Es ist so biegsam konstruiert, dass es auch bei Höhenunterschieden in den Baumkronen von bis zu acht Metern genutzt werden kann. Ein Schritt im Netz zwischen den Luftschläuchen kann fast ei- ▶

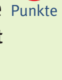


Unterwegs zum Landeplatz auf den Bäumen: das Baumfloß, Französisch-Guayana 1996.

5×5 Test® Sachbuch
Top Ten Oktober 2002

Die Sachbuch-Rezensionen von wissenschaft-online (http://www.5x5test.de) enthalten eine Punktwertung: Für die Kriterien Inhalt, Vermittlung, Verständlichkeit, Lesespaß und Preis-Leistungsverhältnis vergibt der Rezensent jeweils bis zu fünf Punkte. Die Liste führt die zehn Bücher mit den höchsten Gesamtpunktzahlen auf (Erscheinungszeitraum der Rezensionen: 14. Juni bis 1. Oktober 2002).

1. **Michael Pollan** — 24 Punkte
   Die Botanik der Begierde
   Vier Pflanzen betrachten die Welt
   Claassen, 375 Seiten, € 19,00



2. **Edward O. Wilson** — 22
   Die Zukunft des Lebens
   Siedler, 254 Seiten, € 19,90



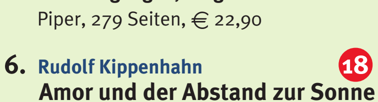
3. **K. Daumer, J. Vetter (Hg.)** — 22
   Wohin die Reise geht ...
   Lebenswissenschaften im Dialog
   Wiley-VCH, 114 Seiten, € 15,90



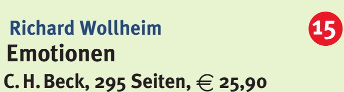
4. **Lawrence Lessig** — 20
   Code
   Und andere Gesetze des Cyberspace
   Berlin-Verlag, 493 Seiten, € 22,00



5. **Richard P. Feynman** — 18
   Es ist so einfach
   Vom Vergnügen, Dinge zu entdecken
   Piper, 279 Seiten, € 22,90



6. **Rudolf Kippenhahn** — 18
   Amor und der Abstand zur Sonne
   Piper, 186 Seiten, € 17,90



7. **Richard Wollheim** — 15
   Emotionen
   C. H. Beck, 295 Seiten, € 25,90

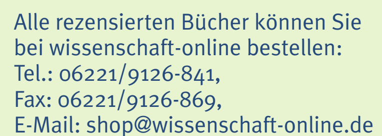


8. **K. C. Cole** — 10
   Eine kurze Geschichte des Universums
   Aufbau-Verlag, 308 Seiten, € 20,00



9. **Christian Ziegler** — 10
   Aufmerksamkeitsstörungen bei Kindern
   Klett-Cotta, 237 Seiten, € 20,00

10. **Ursel Fuchs** — 17
    Die Genomfalle
    Versprechungen der Gentechnik, ihre Nebenwirkungen und Folgen
    Patmos, 270 Seiten, € 22,00





Alexandra und Jean-Louis Tripp dreißig Meter über dem Erdboden in dem Icos-Käfig, festgeklemmt zwischen den Ästen eines Okumébaumes am Makandé-Fluß in Gabun, 1999

nen Meter in die Tiefe führen, und jede Bewegung bringt das Floß ins Wanken. „Versuchen Sie doch aus Neugier mal, ein Puzzle zusammenzusetzen, wenn Sie in einer Hängematte sitzen, die im zehnten Stockwerk am Balkon hängt", beschreibt ein Zeichner auf dem Baumfloß seine Arbeitsbedingungen.

Und die Forschung auf dem Kronendach ist erstaunlich vielseitig. Vertreter aus mehr als 25 Fachgebieten nutzen bereits die neue Methode: Neben Botanik, Genetik und Entomologie (Insektenforschung) zählen auch ausgefallenere Disziplinen wie etwa die Bioklimatologie dazu. Während im Unterholz die relative Luftfeuchtigkeit fast konstant bei 90 Prozent liegt, ergaben sich auf dem Urwalddach starke Schwankungen: Die Wetterbedingungen oberhalb der Kronen entsprechen denen in der Sahara! So liegt die relative Luftfeuchtigkeit nachts bei 100 Prozent – der Urwald liegt dann regelrecht im Nebel – und fällt in den Mittagsstunden des Tages auf bis zu 40 Prozent ab. In der Folge verfallen viele Bäume in diesem Zeitraum in eine wahre „Mittagsdepression", in der sie die Photosynthese reduzieren oder ganz unterbrechen.

Aber auch der Kampf mit den Landesbehörden, Misserfolg und Frust gehören zur Forschung. Die erste Landung des Baumfloßes scheitert kläglich, da der Standort denkbar schlecht gewählt ist. Die als Stütze ausgewählten Morototos, schnell wachsende Pioniergehölze mit einem sehr biegsamen Holz, halten gerade 45 Minuten dem Gewicht der Plattform stand. Luftstreitkräfte müssen den Wissenschaftlern schließlich zur Hilfe kommen, um das Floß zu bergen. 1989 scheitert eine Mission in Brasilien komplett am Widerstand der Behörden. Das Lager wird von den Militärs geschlossen.

Bei aller Kuriosität und Abenteuerlichkeit dieser Forschung auf den Wipfeln des Regenwaldes wird zum Ende des Buches ihr wichtiges und überaus ernsthaftes Potenzial ganz deutlich: Sie könnte zur Rettung für den bedrohten Regenwald werden! Denn sie ermöglicht auch den Zugang zu einer ungeheuren, noch kaum erforschten Naturreserve. Rohstoffe mit Anwendungsmöglichkeiten in der Pharmazie, Medizin und Chemie, aber auch bei der Herstellung von Parfüms und Lebensmittelaromen hat der Regenwald in Hülle und Fülle zu bieten. Eine Nutzung dieser Ressourcen wäre nicht nur Gewinn bringender als seine Abholzung, sondern würde gleichzeitig auch den Erhalt des Urwaldes wirtschaftlich lohnenswert machen.

Das Buch erfüllt, was der Titel verheißt: Es bietet Einblick in einen Bereich, in dem Forschung oft noch Abenteuer ist. Fotos, kleine Skizzen, einleitende Zitate und eingeschobene Kurzberichte der Beteiligten vermitteln die besondere Urwaldstimmung, sorgen für Anschaulichkeit und lockern das Buch auf angenehme Weise auf. Das Resultat sind sehr vergnügliche Lesestunden.

Imke Ortmann

Die Rezensentin hat Biologie und Chemie studiert und ist Wissenschaftsjournalistin in Münster.

Virtuelle Sternstunden

Ein Mausklick überbrückt astronomische Entfernungen und lässt Galaxien spektakulär kollidieren.

Von Thilo Körkel

Bevor Sie in die Kälte des Alls aufbrechen: Nutzen Sie den öffentlich subventionierten Planeten-Nahverkehr im Lichte unserer Sonne. Zumal diese Gegend – auch im Datennetz – am besten erschlossen ist.

Schnell geraten Sie dabei in das Gravitationsfeld der publikumswirksamen Seiten der Nasa. Für den Abflug ins Sonnensystem eignet sich www.jpl.nasa.gov/missions/missions_index.html. Das kalifornische Jet Propulsion Laboratory, Zentrum der Nasa für die unbemannte Raumfahrt, stellt dort seine vergangenen und künftigen Missionen ausführlich vor: von den ersten beiden Voyager-Sonden, die 1977 zu Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun aufbrachen und mittlerweile dem Sonnensystem den Rücken kehren, bis hin zum Terrestrial Planet Finder, den die Nasa erst für 2014 plant und der erdähnliche Planeten aufspüren soll.

Prominentere Projekte wie die Raumsonde „2001 Mars Odyssey“ warten mit eigenen Homepages auf (mars.jpl.nasa.gov/odyssey/index.html). Mittlerweile seit einem knappen Jahr in einer Marsumlaufbahn, sorgte die Odyssey Mitte dieses Jahres für spektakuläre Eisfunde unterhalb der Marsoberfläche (Spektrum der Wissenschaft 09/2002, S. 12). Oberhalb davon ist alles Wüste: Die sehenswerte Fotogalerie zeigt ausgetrocknete Canyons, Staubstürme und Polarkappen aus gefrorenem Kohlendioxid.

Ein Klassiker im Netz sind die „Neun Planeten“ (www.nineplanets.org, eine deutsche Übersetzung findet sich unter www.wappswelt.de/tnp/nineplanets/nineplanets.html). Die Multimedia-Tour durchs Sonnensystem von Bill Arnett umrundet über siebzig Planeten und Monde einschließlich der Sonne. Bilder und Töne, gelegentlich ein Video, zieren das übersichtlich organisierte Monumentalwerk. Sogar Essays über angebliche Planeten, die sich anschließend als nicht existent herausstellten, oder die Regeln der astronomischen Namensgebung für Himmelskörper sind nachzulesen.

Auf planetquest.jpl.nasa.gov, von der National Academy Press zur „Coolest Science Site“ im August 2002 gekürt, dokumentiert die Nasa ihre Suche nach extrasolaren Planeten. Neue Funde finden gebührende Erwähnung, im Juli 2002 wurde die 100er-Marke überschritten.



Sternleiche in 5000 Lichtjahren Entfernung: Der „Eskimo“-Nebel NGC 2392 bekam seinen Spitznamen, weil er in schwächeren Teleskopen den Eindruck eines Gesichts mit Fellmütze hinterlässt. Das Hubble-Teleskop nahm diese Überreste eines explodierten Sterns genauer ins Visier (http://oposite.stsci.edu/pubinfo/pr/2000/07/index.html).

Auch die Technik des Aufspürens von Planeten, unter anderem mit Hilfe der optischen Interferometrie, können Besucher dort nachvollziehen.

Das „virtuelle Teleskop“ der Nasa lässt sich beliebig schwenken. Anders als echteTeleskope erlaubt es sogar einen 360-Grad-Rundumblick in den Himmel wie in diesem Radiowellenbild, das man sich zum Hohlzylinder gerollt denken muss (http://skyview.gsfc.nasa.gov/docs/easy.html).

Ein virtuelles Observatorium im Netz bietet mehr, als der Blick durchs eigene Teleskop je erfassen könnte: Auf skyview.gsfc.nasa.gov kann der gesamte Himmel über alle Wellenlängen hinweg abgesucht werden. Das erfordert allerdings reichlich Vorkenntnisse und einen User, der sich eingehend mit der Site beschäftigt. Schneller froh wird, wer nur wissen will, welche Sternbilder in Deutschland am Nachthimmel hängen: www.sternklar.de/planetarium/aktuelle_Sternenhimmel.htm verrät dies für jede Tages- und Nachtzeit und liefert dazu noch Informationen über Sternennebel und Galaxien aus dem historischen Messier-Katalog.

Selbst Hintergrund-Sites können überraschend lesenswert sein: beispielsweise die „Astronomiae Historia“ unter www.astro.uni-bonn.de/~pbrosche/astoria.html. Unter der Rubrik „Astrophysics“ etwa kann der Leser wissenschaftliche Debatten über die Größe des Universums nachlesen. Oder er findet den Beitrag „Little Green Men, White Dwarfs or Pulsars?“, in dem die Wissenschaftlerin S. Jocelyn Bell Burnell unterhaltsam ihre ganz persönliche Geschichte über die Entdeckung von Pulsaren erzählt (www.bigear.org/vol1no1/burnell.htm).

„Per Internet durch die Galaxis“ – wer sich auf seinem kosmischen Abenteuertrip noch mit reichlich Action belohnen will, besuche das Dynamical Astronomy Javalab der Case Western Reserve University (burro.astr.cwru.edu/JavaLab/web/main.html). Im Zeitraffer umkreisen sich dort Planeten und Sterne, und ganze Galaxien stürzen ineinander.



Wasserschwall und Überschall

An einer bestimmten Stelle bricht sich schießendes Wasser – auf dem Teller, im Spülbecken oder im Auslauf einer Talsperre. Aber wo genau? Die Antwort erfordert einen Ausflug in die Theorie des Überschallflugs.

VON WOLFGANG BÜRGER

Wassersprung: Einen Teller abzuspülen ist keine Kunst. Wir halten ihn in einen Wasserstrahl – und übersehen nur zu leicht ein kleines Wunder der Natur.

Nehmen wir einen flachen Teller. Tiefe Suppenteller könnten voll Wasser laufen und das Phänomen in einem kleinen See ertränken. Wir drehen das Wasser nicht zu stark auf, um das, was wir beobachten wollen, nicht über den Tellerrand zu spülen. Sollte auch ein flacher Teller noch zu tief sein, versuchen wir es mit seiner Rückseite, indem wir den Standring des Porzellans als ein provisorisches „Wehr“ zum Stau des Wassers verwenden. Wenn wir den Teller waagerecht in den Strom halten und den Strahl, so gut wir können, auf seine Mitte lenken, ist die Strömung kreissymmetrisch um den Wasserstrahl, und diese Symmetrie vereinfacht die Beschreibung. Die Wasserzufuhr lässt sich am Wasserhahn kontrollieren. Der Vorgang hängt außer von der pro Zeiteinheit zufließenden Wassermenge von der Auftreffgeschwindigkeit des Wassers auf dem Teller ab, die sich durch die Wahl der Fallhöhe des Wasserstrahls in Grenzen regeln lässt. Bei sehr dünnem Strahl sollte der Abstand des Tellers vom Wasserhahn nicht so groß sein, dass der Strahl in Tropfen zerfällt, ehe er den Teller erreicht.

Der Teller lenkt das Wasser, ohne dass es spritzt, sanft in die Waagerechte. Der geeignet eingeregelte Wasserstrom „schießt“ (wie die Hydrauliker es nennen) zunächst vom Strahl weg als flacher Flüssigkeitsfilm in alle Himmelsrichtungen.

Theorie des Wassersprungs

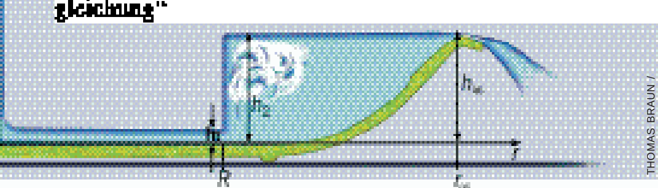
Vom Tellerwäscher zum Hydrologen

Strömt Wasser als Freistrahl aus dem Hahn, hört augenblicklich die Haftung des Wassers an der Wand der Rohrleitung auf, und die innere Reibung der Flüssigkeit kann für den Geschwindigkeitsausgleich im Strahlquerschnitt sorgen. Gleichzeitig beschleunigt die Schwerkraft das Wasser mit $g = 9{,}81\ \mathrm{m/s^2}$. Beide Einflüsse machen den Strahl umso schlanker, je weiter er fällt. Bei einer mittleren Geschwindigkeit v_0 im Austrittsquerschnitt vom Radius r_0 kommt aus dem Hahn der „Volumenstrom“ (Wasservolumen pro Zeiteinheit) $Q = \pi r_0^2 v_0$. Da wir ein System im dynamischen Gleichgewicht betrachten, fließt durch jede Fläche, die wir in Gedanken dem Wasser in den Weg legen, derselbe Volumenstrom Q. Insbesondere plätschern Q Kubikzentimeter Wasser pro Sekunde über den Tellerrand. Ist die Geschwindigkeit des Wassers im Strahl nach dem Fall durch die Höhe ℓ bis zum Teller auf $v_* = \sqrt{v_0^2 + 2g\ell}$ angewachsen, hat der Strahl nur noch den Radius $r_* = \sqrt{Q/(\pi v_*)}$.

Am Teller wird das Wasser sanft in die Waagerechte umgelenkt und strömt nach allen Seiten als flacher Wandstrahl weiter. Da bei dieser Umlenkung nicht in nennenswertem Umfang Energie verloren geht, behält das Wasser seine Geschwindigkeit v_* zunächst bei. Die Bedingung $v_* > \sqrt{g h_*}$ für die schießende Bewegung, die dem Überschall bei Gasströmungen entspricht, ist bereits bei kleinen Fallhöhen erfüllt.

Dagegen ist schwer abzuschätzen, wie danach die innere Reibung der Flüssigkeit den flachen Strahl an der Telleroberfläche bremst. Im Folgenden gehe ich das Risiko ein, den Radius des Wassersprungs zu überschätzen, indem ich die Reibung ganz vernachlässige. Unter dieser Voraussetzung ist nach der Gleichung von Bernoulli die Geschwindigkeit v im Wandstrahl bei stationärer Strömung örtlich und zeitlich konstant und gleich v_*, solange der Strahl nichts vom Stau am Tellerrand erfährt, und man kann aus dem unveränderlichen Volumenstrom $Q = 2\pi r h v_*$ die Dicke h der Wasserschicht in jedem Abstand r vom Zentrum bestimmen.

Die Katastrophe kommt unerwartet beim Radius R in Gestalt des Wassersprungs, bei dem die Wasserhöhe von $h_1 = Q/(2\pi R v_*)$ plötzlich auf h_2 ansteigt. Wegen der Konstanz des Volumenstroms Q, die in der „Kontinuitätsgleichung“



THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Bei einem bestimmten Radius staut er sich in einem „Wassersprung“, einem wirbelnd durchströmten Ringwall, in dem der Wasserspiegel dramatisch ansteigt. Hinter dieser „Staustufe“ ohne Mauer fließt das Wasser in einer dickeren Schicht und entsprechend langsamer nach außen weiter, um sich schließlich über den Tellerrand zu ergießen.

Wer einmal einen Wassersprung auf dem Teller gesehen hat, entdeckt leicht überall, wo Wasserstrahlen auf feste Wände fallen, kreisförmige, parabolische und anders geformte Wassersprünge: im Waschbecken (Bild rechts), in der Badewanne, unter der Dusche und bei heftigen Regenschauern gelegentlich auf dem Asphalt der Straße.

Überschall: Wassersprünge sind an sich erstaunlich genug. Noch bemerkenswerter ist jedoch ihre physikalische Verwandtschaft mit den Stoßwellen, die ein Flugzeug abstrahlt, sobald es schneller als der Schall fliegt. Diese Verwandtschaft ist mehr als eine Analogie. Ihr steht nicht entgegen, dass Schallwellen sich räumlich, Wasserwellen aber nur in einer flachen Schicht an der Oberfläche ausbreiten.

Überschall-Flieger nähern sich nicht nur leise, sondern im Wortsinne unhörbar. Wir können sie kommen sehen, denn das Licht breitet sich (fast eine Million Mal) schneller aus als der Schall. Aber erst wenn das Flugzeug längst über uns hinweg geflogen ist, meldet auch der Schall seine Ankunft – durch zwei kurze, rasch aufeinander folgende Knallwellen („Bäng-bäng“), die von Bug und Heck des Rumpfes ausgehen. Die Schallwellen, die uns die Nachricht vom Vorbeiflug bringen, kommen nicht von dem Ort, an dem sich das Flugzeug in diesem Augenblick befindet, sondern von der weit zurück liegenden Stelle, von der sie ausgesandt wurden (Bild Seite 118 oben).


MARK CRAMER, VIRGINIA TECH

Wassersprung im Küchen-Spülbecken

Schallwellen und Flachwasserwellen: Der Schallgeschwindigkeit $c_s = \sqrt{\gamma p/\rho}$ (Druck p, Dichte ρ, Adiabaten-Exponent $\gamma = 1{,}40$), mit der sich Verdichtungswellen in der Luft ausbreiten, entspricht

---

(A) $$\frac{Q}{2\pi R} = h_1 v_a = h_2 v_2$$

zum Ausdruck kommt, sinkt die Strömungsgeschwindigkeit gleichzeitig auf v_2. Hinter dem Wassersprung strömt das Wasser langsamer, als sich Oberflächenwellen ausbreiten: $v_2 < \sqrt{g h_2}$. Hier können die Wellen daher die Information über die Höhe des Wasserspiegels rechtzeitig von einem Ort (Tellerrand) zum anderen (Wassersprung) transportieren.

Bei Durchgang durch den Wassersprung wird Bewegungsenergie „verheizt“ (in Wärme umgesetzt): Der Wasserstrom verliert an mechanischer Energie. Ein weiterer Teil der kinetischen Energie dient dazu, das Wasser gegen die Schwerkraft vom Niveau h_1 auf h_2 zu heben. In dem Maße, wie sich dadurch der hydrostatische Druck in der Wasserschicht erhöht, verringert sich der Impulsstrom. Das liefert die zweite Sprungrelation: $2h_2/h_1 = \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1$. Dabei ist die Froude-Zahl $F_1 = v_a/\sqrt{g h_1} > 1$ definiert als das Verhältnis der Strömungs- zur Wellengeschwindigkeit unmittelbar vor dem Wassersprung; sie entspricht der Machzahl einer Überschallströmung. Für das Experiment auf dem Teller wird der Wassersprung als „stark“ (F_1 viel größer als 1) angenommen. Unter dieser Voraussetzung vereinfacht sich die Sprungrelation zu der Gleichung

(B) $$h_2^2 = 2 v_a^2 h_1 / g \, .$$

(A) und (B) sind nur zwei Gleichungen zur Bestimmung der drei gesuchten Größen R, h_2, v_2 am Wassersprung. Die dritte Gleichung liefert der Abfluss: Der ansteigende Tellerrand ist ein flaches „Messwehr“ ähnlich denen, die Hydrauliker zur Regelung von Wasserströmen in offenen Gerinnen dienen. Die Kreisform ist in der Praxis nicht ungewöhnlich.

Der am Wassersprung bei $r = R$ sehr langsam gewordene Wasserstrom muss wieder Fahrt aufnehmen, um bei $r = r_\infty$ über den Tellerrand abfließen zu können. Die nötige Beschleunigung bekommt er durch ein Gefälle: Von $r = R$ bis $r = r_\infty$ sinkt der Wasserspiegel geringfügig ab – allerdings so wenig, dass man dieses Absinken im Vergleich zur Gesamthöhe des Wasserspiegels ebenso vernachlässigen kann wie die Dicke des abfließenden Wasserfilms. Damit wird die dritte Bestimmungsgleichung sehr einfach:

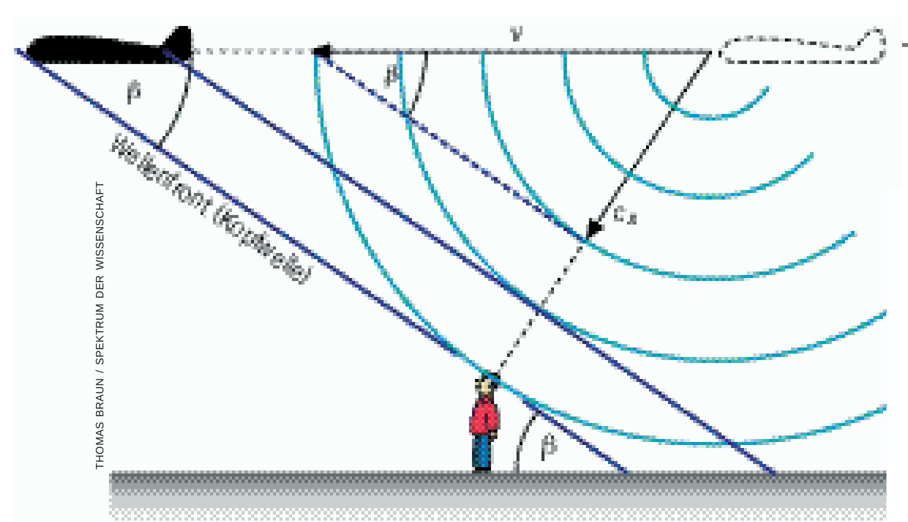
(C) $$h_2 = h_\infty$$

Der Wasserspiegel am Sprung ist so hoch wie der Tellerrand.

Aus (A), (B) und (C) folgt für den Radius des Wassersprungs:

$$R = \frac{Q v_a}{(\pi g h_\infty^2)} \quad \text{mit } v_a = \sqrt{v_0^2 + 2g\ell} \text{ und } v_0 = Q/(\pi r_0^2)$$

Der Radius R wächst also mit dem Volumenstrom Q und der Auftreff-Geschwindigkeit v_a, während er mit zunehmender Höhe h_∞ des Tellerrandes kleiner wird. Für plausible Werte der Parameter ($Q = 78\ \mathrm{cm}^3/\mathrm{s}$, $h_\infty = r_0 = 0{,}6\ \mathrm{cm}$, $\ell = 10\ \mathrm{cm}$ und $g = 981\ \mathrm{cm/s^2}$) ergibt sich $R = 11\ \mathrm{cm}$. Bei Berücksichtigung der inneren Reibung des Wassers würde der Zahlenwert vermutlich kleiner ausfallen.

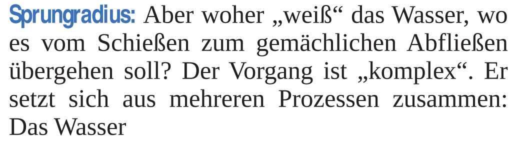


Ein Beobachter am Boden kann aus dem Öffnungswinkel des „Machkegels“ (dem Winkel β gegen den Horizont, unter dem ihm das Flugzeug beim Emp-fang des ersten Schallsignals erscheint) und der Schallgeschwindigkeit c_s die Fluggeschwindigkeit bestimmen: $V = c_s/\sin\beta$.

bei Oberflächenwellen auf flachem Wasser die Grundwellengeschwindigkeit $c_g = \sqrt{gh}$ (Wassertiefe *h*, Schwerebeschleunigung *g*). Wasser, das schneller strömt als die Grundwellengeschwindigkeit, schießendes Wasser also, schwemmt Oberflächenwellen stromab. Diese Wellen können also keine Nachricht von einem möglichen Stau am Tellerrand ins Innere tragen, ebenso wenig, wie die Schallwelle einem Überschallflugzeug vorauseilen kann. Schallwellen und Flachwasserwellen ist gemeinsam, dass Wellen aller Wellenlängen sich mit gleicher Geschwindigkeit fortpflanzen.

Wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Welle von ihrer Wellenlänge abhängt, hat das Medium eine so genannte Dispersion. Wenn es sie bei Schallwellen gäbe, wäre das katastrophal für die Übertragung von Musik. In Konzertsälen würden sich Töne verschiedener Höhe mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ausbreiten und in jedem Ohr an jedem Ort eine andere Mischung, ein anderes Geräusch, erzeugen.

Wirft man dagegen einen Stein in einen Teich, kann man die Dispersion der (Tiefwasser-) Oberflächenwellen beobachten. Teiche sind für Oberflächenwellen immer „tief“, und Wellen laufen darauf um so schneller, je größer ihre Wellenlänge ist (Wellen der Wellenlänge λ mit der Geschwindigkeit $c_t = \sqrt{g\lambda/(2\pi)}$). Daher sieht man auf der Wasserfläche lange Wellen unter den kurzen durchtauchen und sie vorübergehend auf den Rücken nehmen.



Sprungradius: Aber woher „weiß“ das Wasser, wo es vom Schießen zum gemächlichen Abfließen übergehen soll? Der Vorgang ist „komplex“. Er setzt sich aus mehreren Prozessen zusammen: Das Wasser

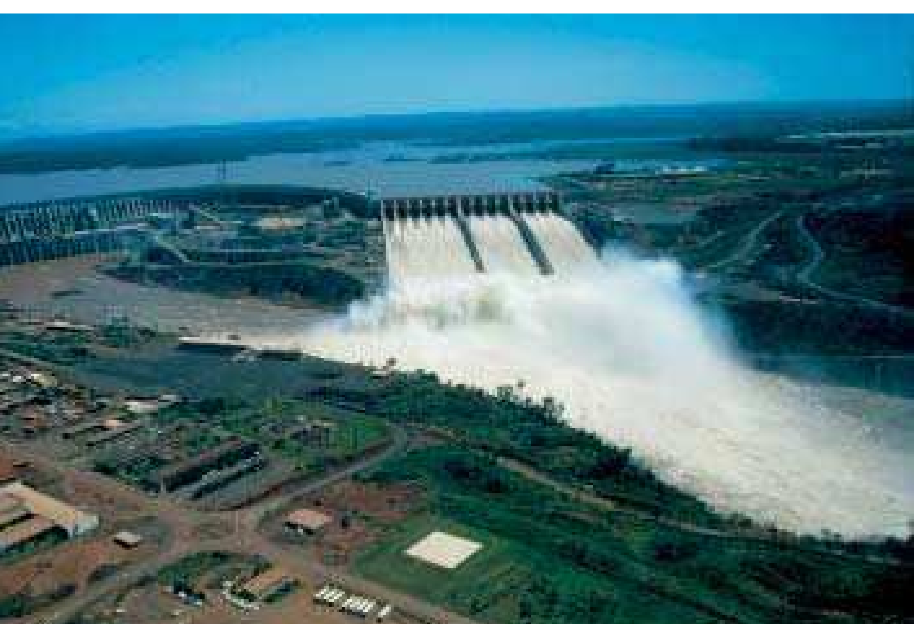
➤ strömt aus der Leitung, wodurch die Rohrströmung zum Freistrahl mutiert,
➤ trifft im freien Fall auf den Teller auf,
➤ wird zum Wandstrahl umgelenkt und „schießt“ radial nach außen, mit überkritischer Geschwindigkeit und daher unbeeinflusst von dem Wassersprung, auf den es zu strömt,
➤ strömt weiter außen sehr langsam auf den Tellerrand zu und
➤ steilt sich, mittendrin, zum Wassersprung auf, dessen Lage und Höhe von den Bedingungen der Strömung auf seinen beiden „Ufern“ bestimmt wird.

Innerhalb des Wassersprungs selbst ist die Flüssigkeit in heftiger, turbulenter Bewegung – für den Theoretiker etwas vom Schwierigsten (Spektrum der Wissenschaft 12/1997, S. 92). Zugleich ändern sich gewisse Größen des Systems – in diesem Fall Strömungsgeschwindigkeit und Höhe des Wasserspiegels – sehr rasch auf kleinem Raum. Beide Eigenschaften hat der Wassersprung mit der Überschall-Stoßwelle gemeinsam, und die Physiker wählen für beide Probleme ähnliche Lösungswege: Sie setzen ausnahmsweise das geheiligte Prinzip „Die Natur macht keine Sprünge“ außer Kraft, zumindest für die theoretische Modellierung.

Wenn man genau hinschaut, ist der Wasserspiegel im Wassersprung nicht geformt wie eine kantige Treppenstufe. Für die Modellierung ist es jedoch hilfreich, so zu tun, als wäre er es. Die Variable *h*, welche die Höhe des Wasserspiegels beschreibt, ist also an dieser Stelle unstetig. Manche physikalischen Gesetze sind dann nicht mehr anwendbar, denn sie sind Differenzialgleichungen: In ihnen stehen Größen, die nicht nur stetig, sondern sogar differenzierbar sein müssen, damit die Gleichung überhaupt einen Sinn hat. Der Höhenunterschied zwischen zwei Punkten müsste also rasch gegen null gehen, wenn die beiden Punkte sich einander annähern. Das ist in einer Unstetigkeit nun gerade nicht der Fall.

Also müssen die Physiker für diese Fälle neue Bedingungen („Übergangsbedingungen“) finden, welche die Zustände beiderseits der Unstetigkeit miteinander verknüpfen, und dafür gelegentlich Prinzipien heranziehen, die im differenzierbaren Fall keine Rolle spielen. Bei der Überschall-Stoßwelle ist es interessanterweise das Entropieprinzip: Über den Stoß hinweg kann die Entropie (das thermodynamische Maß für die Unordnung) höchstens zunehmen.

Der Abfluss eines Stausees (hier der See von Itaipu in Brasilien) wird häufig so ausgelegt, dass ein Wassersprung entsteht, der die ansonsten zerstörerische Bewegungsenergie des Wassers aufzehrt.


MAURITIUS / CAMARA TRES

Literaturhinweis

Wassersprünge. Von Jearl Walker. Experiment des Monats, Spektrum der Wissenschaft 06/1981, S. 138.

Die kosmische Leere



Große Leerräume zwischen den Galaxien setzen die Astronomen immer wieder in Erstaunen. Jetzt zeichnet sich ab, dass auch dort, wo fast nichts ist, dramatische Abläufe die Bildung von Galaxien und anderen kosmischen Strukturen beeinflussen.

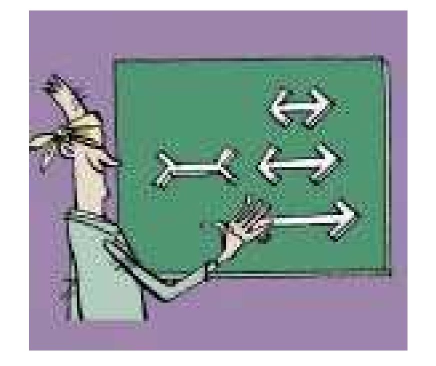
Weitere Themen im November

Aussterbende Sprachen

Wenn nichts geschieht, werden in wenigen Jahrzehnten neunzig Prozent aller heute noch gesprochenen Sprachen ausgestorben sein. Erst allmählich beginnen Linguisten, sich verstärkt um den Erhalt der heutigen Sprach- und Kulturvielfalt zu kümmern.

Fischer in der Wüste

Erschlossen die frühen Siedler Amerika zu Fuß oder auch per Boot? Im „Tal der Esel" an der peruanischen Küste suchten französische Archäologinnen nach Antworten und fanden ein 10 000 Jahre altes Dorf.



Können Hände irren?

Nicht immer dürfen wir unseren Sinnen trauen. Optische Täuschungen sind nur ein Beispiel. Ist auf unseren Tastsinn mehr Verlass?



Organmangel beheben

Die Spenderleber teilen, den kleinen Lappen für ein Kind, den großen für einen erwachsenen Patienten – mit diesen und anderen innovativen Maßnahmen versuchen Transplantationsmediziner mehr aus den raren Spenderorganen zu machen.



Madagaskars fossile Schätze

Auf der viertgrößten Insel der Erde entdeckten Paläontologen die wohl ältesten Überreste von Dinosauriern und zeitgleich lebenden Verwandten von Säugetieren.